半圓頂型屋蓋結構表面平均風壓係數設計值之探討

羅元隆[1] 孫濤[2] 李家豪[2] 鄭啟明[3]

關鍵詞:半圓頂型屋蓋結構、表面風壓係數、高跨比、分區

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。依照我國建築物耐風設計規範中定義，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，屋蓋表面受風壓分佈影響甚鉅，一般不建議以簡易計算方式給定設計風力載重，而另行於規範中表列其表面風壓係數設計值提供給工程師參考。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平均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應對於此類結構型態之表面風壓係數設計值作何修正或建議，並提出本研究於未來規範修訂之建議方案。由初步的風洞實驗結果與各國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)與底座高跨比(h/D)對於分區之影響亦應列入規範修訂考量。

1 淡江大學土木工程學系助理教授

2 淡江大學土木工程學系 大專生

3 淡江大學土木工程學系 教授

Design Values of Mean Pressure Coefficients for Domed Roofs

Yuan-Lung Lo

Department of Civil Engineering, Tamkang University

New Taipei City, Taiwan 251, R.O.C.

Tao Sun

Department of Civil Engineering, Tamkang University

New Taipei City, Taiwan 251, R.O.C.

Chia-Hao Lee

Department of Civil Engineering, Tamkang University

New Taipei City, Taiwan 251, R.O.C.

Chii-Ming Cheng

Department of Civil Engineering, Tamkang University

New Taipei City, Taiwan 251, R.O.C.

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

Abstract

Large span roof structures are one of the most welcomed structural types for its spatial feature and multi-functional performance. Most of them are categorized as low-rise buildings; however, its light-weight and long span characteristics make wind pressures dominate the subsequent structural response and make the wind load evaluation a difficult task. The simplified methodology of design wind loads may not be adoptable. In this research, systematic wind tunnel tests and several codes were compared and discussed on the domed roof structures, which is one category of large

span roof structures. It was demonstrated that the design values in several codes may cause over conservative or unfavorable unsafe design in certain local area of the roof surface. Based on wind tunnel data, this research proposed a suggestive flowchart to evaluate the mean wind pressure coefficients in terms of span height ratio (f/D) and wall height ratio (h/D).

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，因此多為現代建築師設計時所採用的結構型態。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至多於受地震力影響。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。依照我國現行的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與內風壓之風壓淨值，乘以陣風反應因子及有效面積後所得的風力，作為作用於屋蓋表面等值靜力分佈的載重模式。此一計算等值靜力風載重的模式中，風壓淨值以外風壓係數減去內風壓係數後再乘上參考風速壓來決定。而其中決定外風壓係數受曲面造型影響甚鉅，且屋蓋周圍流場特性十分複雜，因此規範中常以表格方式方便工程師查表估算。內風壓係數則常以定值估算。綜觀我國及各國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)，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。然而我國規範中僅存在針對拱型屋蓋類型提供設計值的表格做參考，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[8]針對不同幾何外型的半圓頂型屋蓋進行平均風壓分佈的量測，並改變屋蓋表面粗糙度進行高雷諾數範圍的探討。Toy et al.[13]量測屋蓋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.[10]則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[7]探討屋蓋表面粗糙度對整體結構拖曳力及升力的影響。Tsugawa[15]、Kawamura[6]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[4]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.[16]對單層格子半圓頂型屋蓋結構進行紊流邊界層風洞實驗，將數據以 POD 技巧(Proper Orthogonal Decomposition Technique)模擬，重現圓頂上的風力載重時間序列。Cheng and Fu[3]針對雷諾數不同造成的效應，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.[11]針對雷諾數及幾何外型修正 Yeung[19]所提出之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.[10]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[9]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主要模態，並由頻率域模態分析得到動態效應。Yasui

et al.[17]、[18]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。Kasperski[5]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佈特性以及規範設計值。首先根據屋蓋表面不同的風壓特性依據位置不同進行分區，並與各國規範中所列之分區規則進行比較。接著則以本研究之風洞實驗結果、各國規範、以及本研究利用 Yeung[19]及 Qiu[11]所提出之平均風壓係數分佈模式，進行外風壓係數設計值的討論，提出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、現行各國規範之比較與解說

現行各國規範中對於大跨徑屋蓋結構常以半圓頂型屋蓋以及拱形屋蓋作為評估設計風力值的兩大分類。此兩類屋蓋結構如圖 1 所示，均具有曲面屋頂的特徵。然而半圓頂型屋蓋具有 3D 特性，與拱形屋蓋在長軸上尺度不同，造成設計風力值略有差異。各國規範於評估此兩類屋蓋的設計風力值時，亦有不同的做法。以下各節中，各規範所使用之符號不盡相同，討論以原規範符號之代表意義說明，不做符號上的統一。後續與風洞實驗結果之比較則以統一符號進行說明。

2.1 美國規範 ASCE 7-10[1]

如圖 2 所示為現行美國規範 ASCE7-10[1]仿效 1995 年歐洲規範內容，將屋蓋表面分為 A、B、C 三點進行查表設計。由係數值分佈圖中查得 A、B、C 三點的平均風壓係數值後，依屋蓋圓弧角度予以線性內插，獲得 A-B-C 間的風壓係數分佈。假設屋蓋表面的風壓係數分布，其係數值的變化僅沿著上下游位置而有所變化，而在垂直於來風向的橫風向上為定值。若預設計的屋蓋結構尺寸不恰好等於分佈圖中的範例，則以線性內插估算之。進行設計時應分成兩種風壓係數分佈方式估算風力載重。第一種分佈方式即為上述所說明，依圓弧角度，由上游至下游線性內插估算；第二種方式則假設圓弧上游 0°～25°之間均為 A 點的係數值，25°之後方以線性內插方式進行估算。值得注意的是，美國規範針對半圓頂型屋蓋結構的平均風壓係數，其數值分佈圖僅適用於跨高對跨度比 0.05 至 0.5 之範圍，低於 0.05 則以一般平坦屋頂作為設計依據。

2.2 日本規範 AIJ-2004[12]

如圖 3 及表 1 分別為現行日本規範 AIJ-2004[12]於半圓頂型屋蓋表面的風壓係數值的設計方式。屋蓋表面可分為 R_a、R_b、R_c、R_d 四區，根據不同的跨高與跨度比(f/D)以及底座高與跨度比(h/D)，可透過查詢表 1、或者以表 1 中的係數值線性內插估算得知。與美國規範不同之處在於，各區內的風壓係數值為單一係數，

不隨著圓弧角度而內插，依此所設計出的風力載重呈現階梯狀分佈。R_a 區的風壓係數值需考慮兩種分佈方式，形成兩種風力載重方式。此外，日本規範納入 $f/D = 0$ 平坦屋頂的造型，擴大表格使用範圍在 f/D 上為 0.0 ~ 0.5，而 h/D 則為 0.0 ~ 1.0。

2.3 紐澳規範 AS/NZS 1170.2:2011[2]

紐澳規範[2]中對於半圓頂型屋蓋結構及拱型屋蓋結構給予相同的表面風壓係數設計表格，然而針對拱形屋蓋的設計則須另乘以其他因子，呈現 2D 及 3D 之相異性。如圖 4 所示，紐澳規範將屋蓋表面分成三區，分別為迎風區(U)、中央區(T)、背風區(D)，各區內的係數值均相同。根據跨高與跨度比(r/d)與平均高與跨高比(h/r)作為依據，查詢表 2 或以表 2 中的係數值以線性內插估算得之。其中平均高 h 即為 1/2 跨高加上底座高，表格定義方式與美國或日本規範有所不同。在迎風區與背風區部份各有兩種係數值，故共有四種可能的風力載重方式。此外，若平均高與跨高比(h/r)大於 2，則以 $h/r = 2$ 作為設計依據；且跨高與跨度比(r/d)小於 0.09 者，則以平坦屋頂方式進行設計。

2.4 中國規範 GB 50009-2012[21]

中國規範[21]將兩種屋蓋結構分別以拱形屋頂與旋轉殼頂稱之，旋轉殼頂即為本研究中的半圓頂型屋蓋結構。較上述三規範不同之處為，中國規範不以分區作為係數值設計的方式，而純粹以圓弧仰角(ϕ)進行公式的套用，估算出每一圓弧仰角的風壓係數值。公式以跨高與跨度比 $f/l = 0.25$ 分為兩類，如圖 5 所示。然而中國規範並未定義底座高對風壓係數值分佈的影響。圖 5 中所示之 μ_s 即為本研究的風壓係數值。

2.5 我國建築物耐風設計規範與解說[20]

我國規範[20]中並未對半圓頂形屋蓋有詳細的風壓係數值說明或規定，僅有拱形屋蓋結構的說明。探究其原因在於，我國規範設計早期參考美國規範 ASCE7-88 於 1988 年公布使用的規範，當時 ASCE7-88 內容中並未有針對半圓頂型屋蓋風壓係數值的設計與說明，直至 ASCE7-95 參考歐洲規範後才有。我國規範之修訂於此部分尚未補足，故透過本研究之進行，期望提出一可行方案供未來作為參考。

三、風洞實驗設計與結果討論

3.1 風洞實驗架構

本研究於斷面尺寸為 12.5 (m)長 × 1.8 (m)寬 × 1.8 (m)高的大氣邊界層風洞進行紊流場之模擬，並針對不同幾何造型的半圓頂型屋蓋表面進行風壓分佈量測。照片 1 所示為以粗糙元素及錐形三角架模擬的紊流場。錐形三角架置於來風最上游，作為模擬大氣邊界層中大尺度渦流的產生機構；粗糙元素則由最上游鋪至靠

近目標模型甚或模型周遭，用以作為發展靠近的地表面較小尺度渦流的產生機構。於模擬大氣邊界層氣流時，亦常使用低矮格柵狀阻牆置於錐形三角架與粗糙元素間，用以形成中度尺度渦流。然而由於本研究以後兩者所發展之模擬氣流已約略符合標準地況的曲線分布，故不須再行添加阻牆機構。

圖 6 所示為紊流場之平均風速垂直剖面分佈與紊流強度分佈。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，指數律指數為 $\alpha = 0.27$；紊流強度分布於模型高度處約為 18～23%，隨模型高度變高而減少。

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。藉由變化兩模型的特徵高度可得出各種不同幾何造型的實驗模型組合，其幾何符號意義如圖 7 所示。圖 7 中所示左圖為各規範中三種用以表示風壓係數分佈的方式。為統一之後風壓係數值的探討以及建議方案的便利性，本研究採用圖 7 中的右圖做為座標進行探討及擬合。風壓孔位置可以 θ 作為變化，其中 θ 的範圍則根據 f/D 的不同而改變，如下式所示。以任意的 f/D 為例，θ 的變化範圍由屋蓋上游至下游為 $\theta_1 \sim \theta_2$，其中 θ_1 及 θ_2 可定義為

$$\theta_1 = 90 - \left(\frac{180^\circ}{\pi}\right)\tan^{-1}\left(\frac{4\left(f/D\right)}{1-4\left(f/D\right)^2}\right); \quad \theta_2 = 90 + \left(\frac{180^\circ}{\pi}\right)\tan^{-1}\left(\frac{4\left(f/D\right)}{1-4\left(f/D\right)^2}\right) \quad (1)$$

表 3 所列為本研究中所採用的 f/D 相對應的 θ 範圍。為得到廣泛的應用結果，本研究製作 $f/D = 0.0$、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 的屋蓋模型以及 $h/D = 0.0$、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 的圓形底座模型，共可得到 35 種不同的實驗模型結果($f/D = 0.0$ 且 $h/D = 0.0$ 除外)。本研究採用此座標系則有另一優點，除 $f/D = 0.5$ 為半徑 $D/2$ 的曲面外，其他 $f/D = 0.1$、0.2、0.3、0.4 均可視為較大曲率半徑半圓的部分圓弧。

此外，由於曲面造型的屋蓋結構周圍風場特性受雷諾數(R_e)的影響甚鉅，一般來說必須考慮於高雷諾數範圍下的風場特性為原則。雷諾數的定義為 $R_e = \rho U_H D/\mu$。其中 ρ 為流體密度；U_H 為模型頂部高度平均風速；D 為結構特徵尺度，在本研究中即為半圓頂型屋蓋跨度(直徑)；μ 為動黏滯力係數。根據上述實驗設置可計算出本研究所涉及的雷諾數範圍約為 $1.12 \sim 1.56 \times 10^5$。此雷諾數範圍屬於臨界雷諾數，風場特性變化頗大。然而根據 Cheng and Fu[2]的研究成果指出，受到逼近流紊流強度影響，半圓頂型屋蓋周圍流場在雷諾數 10^5 範圍可趨於穩定。此外，計算本研究中 35 組實驗模型所造成的遮蔽比(Blockage ratio)，最大者約為 2.1%，小於 5%因此本研究所進行的風洞實驗均可視為流速穩定。

3.2 風壓係數計算與數據分析

為探討風洞實驗結果與規範的風壓係數值，所量測到的瞬時風壓均以平均風速壓進行無因次化，因而得到瞬時風壓係數及平均風壓係數之定義如下：

$$C_{p,i} = \frac{p_i - p_s}{0.5\rho \overline{U_H}^2} \tag{2}$$

$$C_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1\sim N} C_{p,i} \tag{3}$$

其中 p_i 為時間點 i 的模型表面風壓孔的瞬時靜壓；p_s 為風洞參考靜壓；式(2)分母部分為模型高度處的參考風速壓。式(3)中的 N 為每段瞬時風壓量測的長度。量測數段後，計算每段之平均風壓係數值，以段平均值作為最後的實驗結果進行比較。本研究探討風壓分佈特性以半圓頂型屋蓋平行於來風風向的中央子午線(meridian)為主要探討對象，實驗量測所需的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，則透過反傳立葉法以風壓管線本身的機械轉換函數修正之。

3.3 平均風壓係數分佈

圖 8 顯示為平均風壓係數分佈隨著 θ 改變的風洞實驗結果。$f/D = 0.0$ 系列為平坦屋蓋，其周圍流場與具有圓弧曲面的屋蓋不同，實驗結果的呈現可與其他做為結果的對照。由於平坦屋蓋無法適用於 θ 座標，故以 x/D 取代之，其中 x 為曲面投影至水平軸距離中央點的位置。

當 $f/D = 0.0$ 時，分離均發生於邊緣銳角處。而 h/D 的影響在於負壓尾跡區的範圍多寡，h/D 愈大，負壓區愈大。

當 $f/D = 0.1$ 時，因為跨高 f 與跨度 D 的比值甚低，曲面造型效應不明顯，因此係數值僅在上游極前端有明顯變化。當 h/D 為 0.0、0.1 時，風壓係數的分佈隨著 θ 增加而緩慢下降至 $\theta = 90^\circ$時約-0.75 左右，而後再逐步回升，整體來說呈現一對稱分佈趨勢。當 h/D 為 0.2 ~ 0.5 時，風壓分佈方式類似於平坦屋蓋，底座高的增加則促使整體行為更偏向於平坦屋蓋結構，因而使得上游極前段部分出現與 $f/D = 0.0$ 類似的分佈行為。美國規範與紐澳規範中均提到其設計的 f/D 範圍有最小值存在，目的在於區分平坦屋蓋與曲面屋蓋的應用屬於不同的概念。

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，因流體無法克服曲面上之逆向壓力梯度所致。分離點後流體持續捲動而產生渦流，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，此為上游曲面面積直接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圓柱體屋頂的流場特性。

整體來說，依據 f/D 及 h/D 的不同，可以歸納出兩類分佈型態: f/D = 0 的平坦屋蓋、f/D > 0.0 的曲面屋蓋。曲面屋蓋在 f/D 介於 0.0 ~ 0.1 時則可以建議兩種載重模式以涵蓋上述所觀察到的上游極前端的分離現象。

3.4 各國規範與風洞實驗結果比較

圖 9 所示為各規範與風洞實驗在 f/D = 0.2 及 0.5 下，h/D = 0.0、0.2 之結果比較。其中美國規範有兩種分佈方式；日本規範在 f/D = 0.2 時有兩種分佈方式，f/D = 0.5 時僅一種；紐澳規範則有四種；中國規範則為一種。綜合來看，同屬階梯式分佈的日本規範與紐澳規範具有類似的趨勢，其中日本規範為四個分區，較三個分區的紐澳規範來的準確。紐澳規範因將紊流特性考量在內，故採用四種分佈方式，然而其他規範則均將紊流另外考慮。美國規範則依據圖 7 中的 φ 角度進行三點間的線性內插，此三點分別為 φ = 0°、φ = 90°、φ = 180°。由圖 9 可看出在 f/D 值偏小時，規範值與風洞實驗值相差甚大。中國規範對於風壓係數值沿圓弧角度改變的公式較具合理性。然而由於沒有考慮底座高的影響，可能會在低 f/D 值的屋蓋結構在分佈上頗有差異。由各國規範與風洞實驗比較結果來看，各規範對於風壓分佈沿著屋蓋上中下游的估算為部分區域偏保守而部分區域偏不保守，似乎未能提供設計者準確的設計值。此外，表格的使用多須利用查表及線性內插計算求得，評估過程稍嫌複雜。

四、平均風壓係數模式

4.1 平均風壓係數模式

本研究提出以兩類屋蓋作為評估半圓頂型屋蓋結構的平均風壓係數模式，以做為未來我國建築物耐風設計規範修訂之參考。由於我國規範的設計精神是將平均值與擾動值分開估算，因此本研究提出之模式僅適用於風壓係數的平均值部分。各國規範多以建物高度處的參考風速壓對建物各處的風壓值作無因次化。而由於各國對於風速定義不同，故參考風速壓亦不同。風壓係數則與建物外型直接相關。本研究僅針對風壓係數的平均值部分提出建議，因此以下所比較的立基點應為一致。

平坦屋蓋的平均風壓係數模式以 h/D 及 x/D 作為變數，觀察 h/D = 0.1 ~ 0.5 實驗結果可發現其最大負風壓約為-1.6 左右，h/D 的改變僅造成負壓範圍的變大而不對負壓值的大小產生影響；穩定區的負壓值則均約為-0.16 左右。因此平坦屋蓋(f/D = 0.0)的平均風壓係數模式可建議為：

$$C_p = \begin{cases} -1.60 & for\ -0.5 < x/D < (x/D)_{cr} \\ -0.16 & for\ (x/D)_{cr} < x/D < 0.5 \end{cases} \tag{4}$$

$$(x/D)_{cr} = 0.53(h/D) - 0.22 \tag{5}$$

其中$(x/D)_{cr}$即為決定最大負壓區範圍之分界線。

針對$f/D > 0.0$的曲面屋蓋，依據風洞實驗結果來看，可發現f/D值較小的曲面屋蓋可視為半圓屋蓋的部分圓弧段。因此在$f/D = 0.1 \sim 0.5$可發現其分佈實為上下游風壓係數的延伸，f/D值愈大，延伸愈接近上游0°以及下游180°。因此曲面屋蓋結構可以半球面的分佈作為一般模式，定義f/D值與θ值的關係即可。針對半球面屋蓋結構，Yeung[19]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]提出的分區概念，以f/D為變數隨著θ位置不同的平均風壓係數值。而後又經過 Qiu[11]針對 f/D 的修正，提出平均風壓係數的分佈公式，其定義如下：

Yeung[19]：

$$C_{p,\theta} = \begin{cases} C_{p,\min} + (C_{p,\max} - C_{p,\min})\sin^2\left(\dfrac{-0.5\pi(\theta-\theta_{\min})}{\theta_{\max}-\theta_{\min}}\right) & 0 < \theta < \theta_{\min} \\ C_{p,\min} + (C_{p,s} - C_{p,\min})\sin^2\left(\dfrac{-0.5\pi(\theta-\theta_{\min})}{\theta_{\max}-\theta_{\min}}\right) & \theta_{\min} < \theta < \theta_s \\ C_{p,s} & \theta_s < \theta < \pi \end{cases} \tag{6}$$

Qiu[11]：

$$C_{p,\theta} = \begin{cases} C_{p,\min} + (C_{p,\max} - C_{p,\min})\dfrac{\sin^2\left(\dfrac{-0.5\kappa\pi(\theta-\theta_{\min})}{\theta_{\max}-\theta_{\min}}\right)}{\lambda(\kappa)} & 0 < \theta < \theta_{\min} \\ C_{p,\min} + (C_{p,s} - C_{p,\min})\dfrac{\sin^2\left(\dfrac{-0.5\kappa\pi(\theta-\theta_{\min})}{\theta_s-\theta_{\min}}\right)}{\lambda(\kappa)} & \theta_{\min} < \theta < \theta_s \\ C_{p,s} & \theta_s < \theta < \pi \end{cases} \tag{6'}$$

$$\lambda(\kappa) = \sin^2\left(\frac{\pi\kappa}{2}\right) \tag{7}$$

$$\kappa = -1.4\left(\frac{f}{D}\right)^2 + 2.7\left(\frac{f}{D}\right) \tag{8}$$

式(6)及(6')中最小平均風壓係數值$C_{p,min}$的對應角度位置為θ_{min}；最大平均風壓係

數值 $C_{p,max}$ 的對應角度位置為 θ_{max}；尾跡區平均風壓係數值 C_{ps} 的對應角度位置為 θ_s。Yeung[19]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 θ 從上游至下游分為三區，式(6)中的係數 θ_{min}、θ_{max}、θ_s、$C_{p,min}$、$C_{p,max}$、$C_{p,s}$ 均以觀察實驗結果而得知，如圖 10 所示。

由風洞實驗結果來看，各項係數可從實驗結果中觀察出受到 f/D 值與 h/D 值的變化。由最大平均風壓係數值 $C_{p,max}$ 及其對應角度 θ_{max} 的觀察中發現，除 $f/D = 0.4$ 或 0.5 外，其他模型的最大平均風壓係數均在上游的最前端。若考慮 $0.0 < f/D < 0.5$ 之間的曲面屋蓋實為半圓球的部分圓弧表面，則可瞭解 f/D 值較小時，最大平均風壓係數應發生在半圓球的上游處，而實際曲面屋蓋的面積可能尚未能出現此一係數值。根據 Yeung[19]提出的方法，最大平均風壓係數值 $C_{p,max}$ 及其對應角度 θ_{max} 可直接以風洞實驗觀察到的風壓係數中的最大值及其位置作為假設並套用至式(6)或(6')。風洞實驗所觀察到之 $C_{p,max}$ 及 θ_{max} 以多項式擬合之則可得到下式(9)，其中 $C_{p,max}$ 需小於或等於 1.0。表 4(a)及 4(b)則為式(9a)及式(9b)之估算值。

$$C_{p,\max} = 3.8\left(\frac{f}{D}\right)\left(\frac{h}{D}\right) + 1.8\left(\frac{f}{D}\right) - 1.2\left(\frac{h}{D}\right) - 0.03 \le 1.0 \tag{9a}$$

$$\theta_{\max} = -76^\circ\left(\frac{f}{D}\right)\left(\frac{h}{D}\right) - 128^\circ\left(\frac{f}{D}\right) + 18^\circ\left(\frac{h}{D}\right) + 76^\circ \tag{9b}$$

相同地，由最小平均風壓係數值 $C_{p,min}$ 及其對應角度 θ_{min} 的觀察則可發現 $C_{p,min}$ 值隨著 h/D 值及 f/D 值而改變，然而 θ_{min} 值則均發生於 90°。因此可考慮 $C_{p,min}$ 值及 θ_{min} 值的建議如下式(10)：

$$C_{p,\min} = -1.3\left(\frac{f}{D}\right)\left(\frac{h}{D}\right) - 1.4\left(\frac{f}{D}\right) - 0.25\left(\frac{h}{D}\right) - 0.6 \tag{10a}$$

$$\theta_{\min} = 90^\circ \tag{10b}$$

表 5 則為風洞實驗中對 $C_{p,min}$ 及 θ_{min} 的觀察，亦可用此表來進行內插計算不同 f/D 與 h/D 的 $C_{p,min}$ 及 θ_{min}。

尾跡區平均風壓係數值 $C_{p,s}$ 及其對應角度位置 θ_s 雖受 h/D 值及 f/D 值的改變而有些許的不同，然而差異極小。根據本研究風洞實驗結果，可簡單假設以下建議值：

$$C_{p,s} = -0.36\left(\frac{f}{D}\right) - 0.06 \tag{11a}$$

$$\theta_s = 135^\circ \tag{11b}$$

此外，由風洞實驗以及各國規範中亦可觀察到，當 f/D 值較小且 h/D 值偏大

時，可能發生於上游前端發生平坦屋蓋效應。且本研究僅針對 $f/D = 0.0$、0.1、0.2 之模型進行實驗，無法探討 f/D 值介於 0.0 與 0.1 之間或 0.1 與 0.2 之間的模型，故無法確切了解平坦屋蓋效應出現的臨界值為何。因此本研究簡單以 $f/D = 0.2$ 為界線，介於 0.0 ~ 0.2 之間的曲面屋蓋均需針對上游前端範圍 $\theta_1 \sim \theta_1+5^\circ$給予第二種分佈，其後之範圍 $\theta_1+5^\circ \sim \theta_2$ 則仍依照式(9)、(10)、(11)進行估算。

$$C_{p,\theta} = C_{p,1} - 1.0\left(\frac{h}{D}\right) \quad \text{for } \theta_1 \le \theta \le \theta_1 + 5^\circ \tag{12}$$

綜合以上所述，圖 11 所示之流程圖可作為對半圓頂型屋蓋結構平均風壓係數估算的初步建議方案。其中所示之各係數值則由表 4、5、6 或式(9)、(10)、(11)定義之，未定義之值則以線性內插方式估算。

4.2 擬合結果與討論

本研究以 Yeung[19]和 Qiu[11]所提出之模式與風洞實驗結果進行比較，如圖 12 所示。由比較結果可看出，當 $f/D = 0.5$ 時，Yeung[19]和 Qiu[11]所提出的公式給予相同的分佈模式；當 $f/D = 0.2$ 時，Qiu[11]模式在上游較為準確，而 Yeung[19]模式則在下游較符合實驗結果。而當 $f/D = 0.1$ 時，出現在上游的平坦屋蓋效應可以用第二種載重形式給予不錯的近似，然而下游的分佈則頗保守。而當 $f/D = 0.25$ 且 $h/D = 0.35$ 時所估算的分佈模式與相近的風洞實驗做比較，則可發現確實落在合理範圍內。綜合來看，Qiu[11]模式在曲面較小的屋蓋上游有不錯的模擬值，而 Yeung[19]模式則在下游較準確；隨著 f/D 值變大，兩模式的差異性越低。此外，針對曲面小的屋蓋給予兩種載重方式也較能符合風洞實驗結果。

4.3 本文建議方案

由上節所示之比較結果與圖 11 示意之建議流程，可進一步綜合修正為以下方案。由於 Qiu[11]模式及 Yeung[19]模式分別在上、下游較為準確，因此綜合式(6)及(6')可得到式(13)如下:

$$C_{p,\theta} = \begin{cases} C_{p,\min} + (C_{p,\max} - C_{p,\min}) \dfrac{\sin^2\left(\dfrac{-0.5\kappa\pi(\theta-\theta_{\min})}{\theta_{\max}-\theta_{\min}}\right)}{\lambda(\kappa)} & 0 < \theta < \theta_{\min} \\ C_{p,\min} + (C_{p,s} - C_{p,\min}) \sin^2\left(\dfrac{-0.5\pi(\theta-\theta_{\min})}{\theta_s-\theta_{\min}}\right) & \theta_{\min} < \theta < \theta_s \\ C_{p,s} & \theta_s < \theta < \pi \end{cases} \tag{13}$$

其中 κ 及 $\lambda(\kappa)$的計算如式(7)、(8)。由實際的風洞實驗比較結果來看，Qiu[11]模式主要目的在於準確地模擬上游平均風壓係數的分布曲線，然而 Qiu[11]模式在中下

游曲線的模擬反而不如 Yeung[19]模式來的好。探究原因在於，Qiu[11]模式提出的平均風壓係數以無因次化角度作為方程式的控制參數，而非本研究中或 Yeung[19]模式中直接以仰角 θ 作為變數，Qiu[11]模式在中下游時僅表現出些微差異性並被忽略。因此若純粹以應用便利性以及模式的準確性來說，於[θ_{min} θ_s]間的修正項 κ 及 $\lambda(\kappa)$似乎不需要考慮。圖 11 的示意圖可修正為圖 13 所示。利用圖 13 的流程重複進行圖 12 之比較，並繪製成圖 14。發現式(13)可更符合風洞實驗整體趨勢，在 *f/D* 值較小的模型系列可確保不至於太過保守的設計；上游的模擬部分亦可保有 Qiu[11]模式的優點。

五、結論

本研究首先探討各國規範於半圓頂型屋蓋結構表面風壓係數的設計值與風洞實驗的比較結果，指出目前各國規範對於此類型結構物之平均風壓係數於部分區域可能發生過於保守或過於不保守的狀況。再者，本研究透過 Qiu[11]或 Yeung[19]所提出的風壓係數分佈模式，利用一系列風洞實驗結果，找出屋蓋結構的高跨比(*f/D*)與底座高跨比(*h/D*)對於兩分佈模式中各項係數的影響。最後提出十分簡易的多項式公式以及模擬流程，針對高跨比(*f/D*)介於 0.0 ~ 0.5 間以及底座高跨比(*h/D*)介於 0.0 ~ 0.5 間的半圓頂型屋蓋結構，給予合理且準確的平均風壓係數設計值，提供工程界的設計參考及未來規範修訂的可能建議方案之一。

參考文獻

[1] ASCE Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures 7-10. ASCE SEI.

[2] Australian/New Zealand Standard Structural design actions Part 2: Wind Actions (AS/NZS 1170.2:2011). HIS.

[3] 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

[4] Hongo T., 1995. Experimental study of wind forces on spherical roofs, Ph.D Thesis, Tohoku University

[5] Kasperski M., 1992. Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design. Eng. Struct., 14, 27-34

[6] Kawamura, S., Kiuchi, T., Mochizuki, T., 1992. Characteristics of wind pressure acting on spatial large dome, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 42, 1511-1512

[7] 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.

[8] Maher, F. J., 1965. Wind loads on basic dome shapes. J. Struct. Div. ASCE ST3. 219-228

[9] 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

[10] 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

[11] 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

[12] Recommendations for Loads on Buildings (2004). Architecture Institute Japan. Tokyo, Japan

[13] 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

[14] Toy, N., Tahouri, B., 1988. Pressure distributions on semi-cylindrical structures of different geometrical cross-section. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 29, 263–272.

[15] 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

[16] 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

[17] 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

[18] 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

[19] 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

[20] 「建築物耐風設計規範及解說」條文增(修)訂審查計畫結案報告，中華民國

101 年 11 月，內政部建築研究所委託研究報告。

[21]「建築結構荷載規範」，2012 年 5 月，中華人民共和國國家標準 GB 50009-2012。

表 1 日本規範 AIJ2004 半圓頂型屋蓋表面風壓係數值參考值

f/D	R_a(Positive)			R_a(Negative)		
	h/D=0	h/D=0.25	h/D=1	h/D=0	h/D=0.25	h/D=1
0	Not necessary			-0.6	-1.4	-1.2
0.05	0.3	0	0	0	-1.0	-1.6
0.1	0.4	0	0	0	-0.6	-1.2
0.2	0.5	0	0	0	0	-0.4
0.5	0.7	0.6	0.6	Not necessary		

f/D	R_b			R_c			R_d		
	h/D=0	h/D=0.25	h/D=1	h/D=0	h/D=0.25	h/D=1	h/D=0	h/D=0.25	h/D=1
0	0	-0.8	-1.2	0	-0.1	-0.4	0	-0.1	-0.3
0.05	0	-0.4	-0.8	-0.2	-0.4	-0.4	-0.1	-0.3	-0.3
0.1	0	-0.4	-0.6	-0.4	-0.6	-0.6	-0.2	-0.4	-0.4
0.2	0	-0.4	-0.6	-0.6	-0.8	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4
0.5	0	-0.3	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-0.2	-0.4	-0.4

表 2 紐澳規範 AS/NZS 1170.2:2011 半圓頂型屋蓋表面風壓係數值參考值

Rise-to-span ratio (r/d)	Windward quarter (U)	Centre half (T)	Leeward quarter (D)
0.09	-(0.2+0.4 h/r) or 0.0		-(0.4+0.2 h/r) or 0.0
0.2	(0.3-0.4 h/r) or 0.0	-(0.55+0.2 h/r)	-(0.25+0.2 h/r) or 0.0
0.5	(0.5-0.4 h/r) or 0.0		-(0.1+0.2 h/r) or 0.0

表 3 本研究模型尺寸與其座標 θ 對應關係表

f/D	θ_1	θ_2
0.1	67.38°	112.62°
0.2	46.40°	133.60°
0.3	28.07°	151.93°
0.4	12.68°	167.32°
0.5	0.00°	180.00°

表 4(a) $C_{p,max}$ 參考值

$C_{p,max}$	h/D = 0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
f/D = 0.1	0.15	0.07	-0.01	-0.10	-0.18	-0.26

0.2	0.33	0.29	0.24	0.20	0.15	0.11
0.3	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49	0.48
0.4	0.69	0.72	0.75	0.79	0.82	0.85
0.5	0.87	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00

表 4(b) θ_{max} 參考值

θ_{max}	h/D = 0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
f/D = 0.1	63.20	64.24	65.28	66.32	67.36	68.40
0.2	50.40	50.68	50.96	51.24	51.52	51.80
0.3	37.60	37.12	36.64	36.16	35.68	35.20
0.4	24.80	23.56	22.32	21.08	19.84	18.60
0.5	12.00	10.00	8.00	6.00	4.00	2.00

表 5 $C_{p,min}$、θ_{min} 參考值

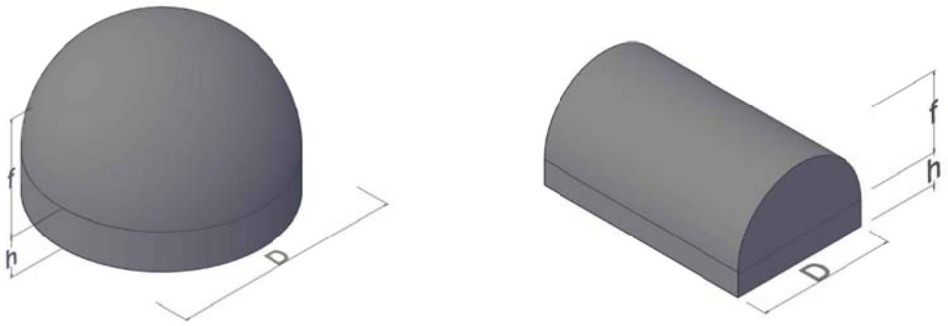
$C_{p,min}$	h/D = 0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
f/D = 0.1	-0.74	-0.78	-0.82	-0.85	-0.89	-0.93
0.2	-0.88	-0.93	-0.98	-1.03	-1.08	-1.14
0.3	-1.02	-1.08	-1.15	-1.21	-1.28	-1.34
0.4	-1.16	-1.24	-1.31	-1.39	-1.47	-1.55
0.5	-1.30	-1.39	-1.48	-1.57	-1.66	-1.75

θ_{min} = 90° for all cases

表 6 $C_{p,s}$、θ_s 參考值

	f/D = 0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$C_{p,s}$	-0.10	-0.13	-0.17	-0.20	-0.24
θ_s			135°		

註：可利用此表以線性內插方式求出未定義之 f/D 值或以式(11)計算。



(a)半圓頂型屋蓋結構　　(b)拱形屋蓋結構

圖 1 大跨徑屋蓋結構示意圖

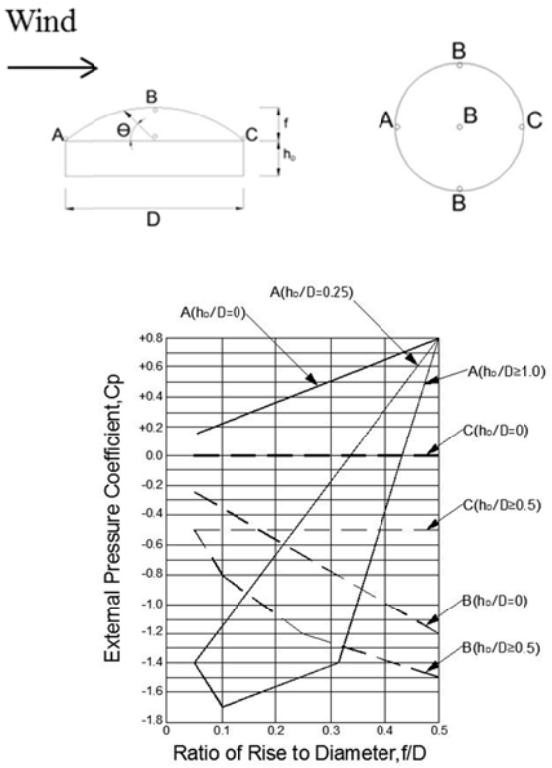


圖 2 美國規範 ASCE7-10 之於半圓頂型屋蓋表面風壓係數設計(圖中為原始使用符號)

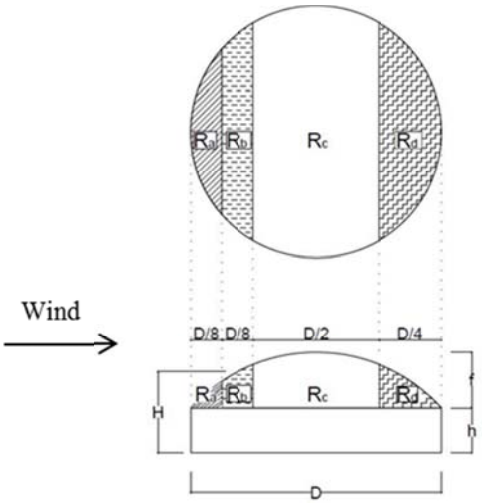


圖 3 日本規範 AIJ-2004 半圓頂型屋蓋分區示意圖(圖中為原始使用符號)

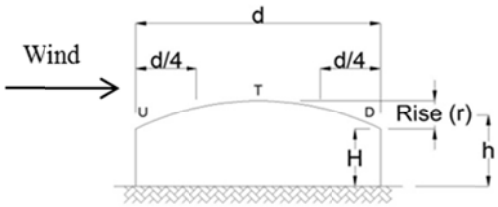


圖 4 紐澳規範 AS/NZS 1170.2:2011 半圓頂型屋蓋分區示意圖(圖中為原始使用符號)

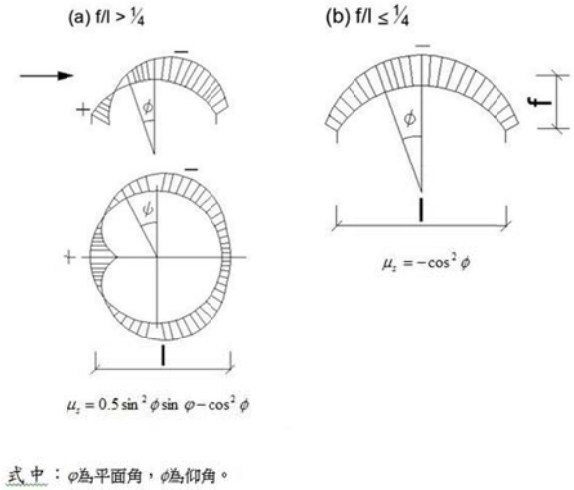
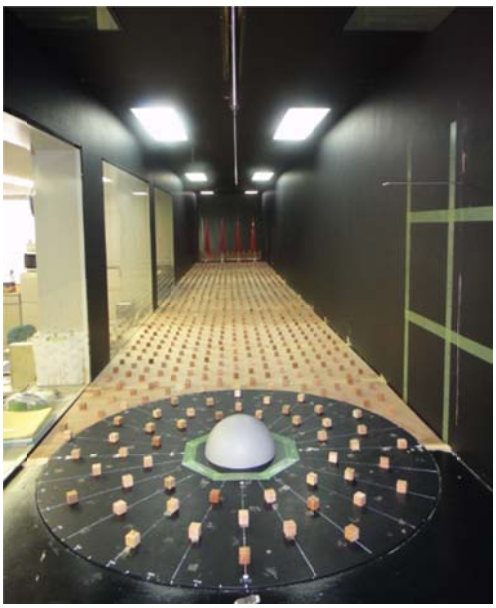
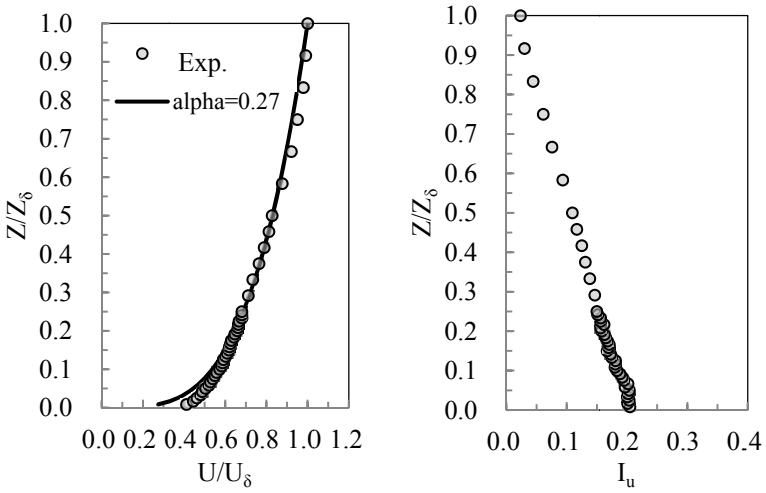


圖 5 中國規範 GB 50009-2012 半圓頂型屋蓋分區示意圖(圖中為原始使用符號)



照片 1 風洞實驗架設實況



(a)平均風速剖面　　(b)紊流強度剖面

圖6 本研究執行風洞實驗模擬紊流場之特性(其中δ為邊界層厚度高度)

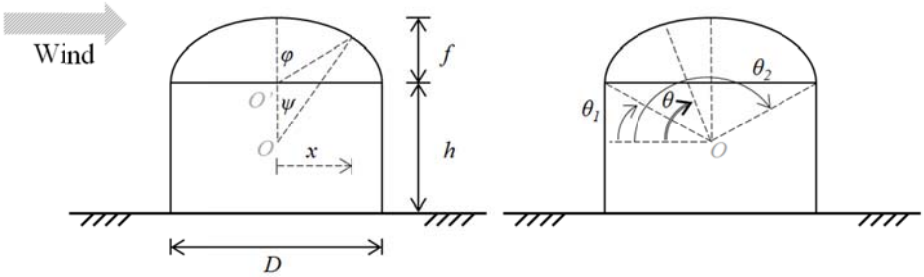
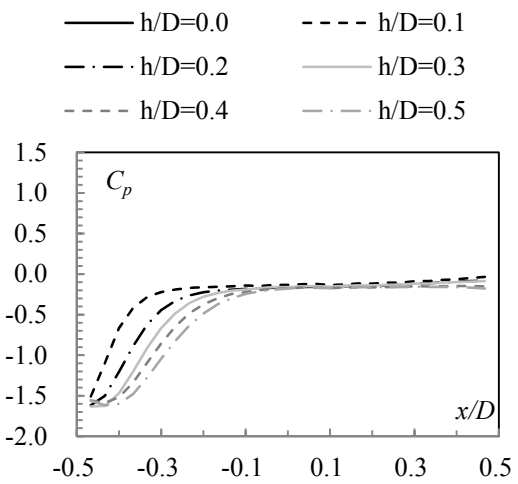
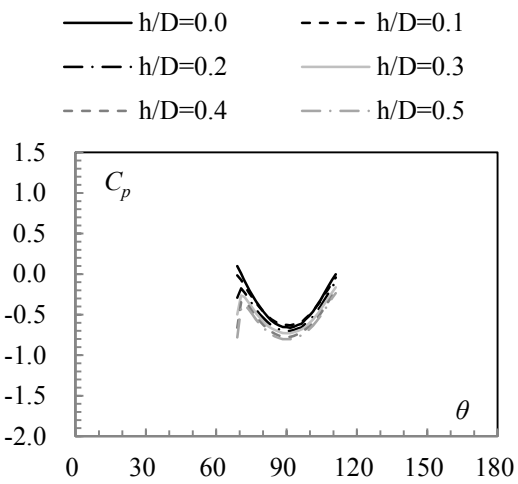


圖 7 風洞實驗模型符號意義示意圖

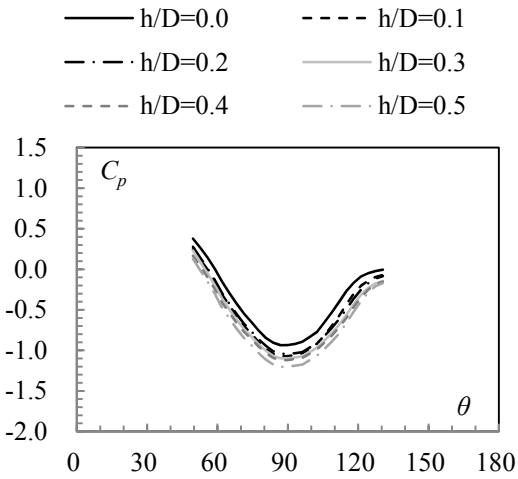
f/D = 0.0



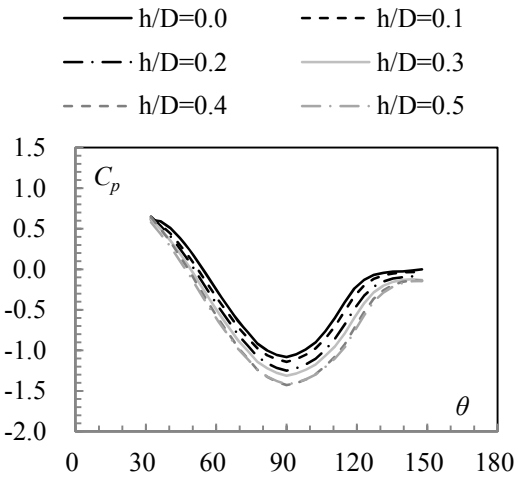
f/D = 0.1



f/D = 0.2



f/D = 0.3



f/D = 0.4

f/D = 0.5

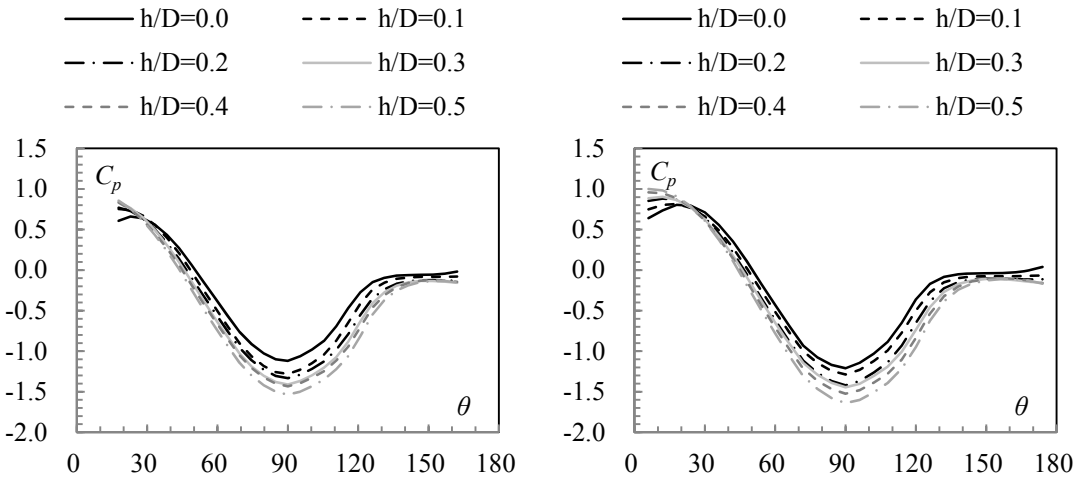
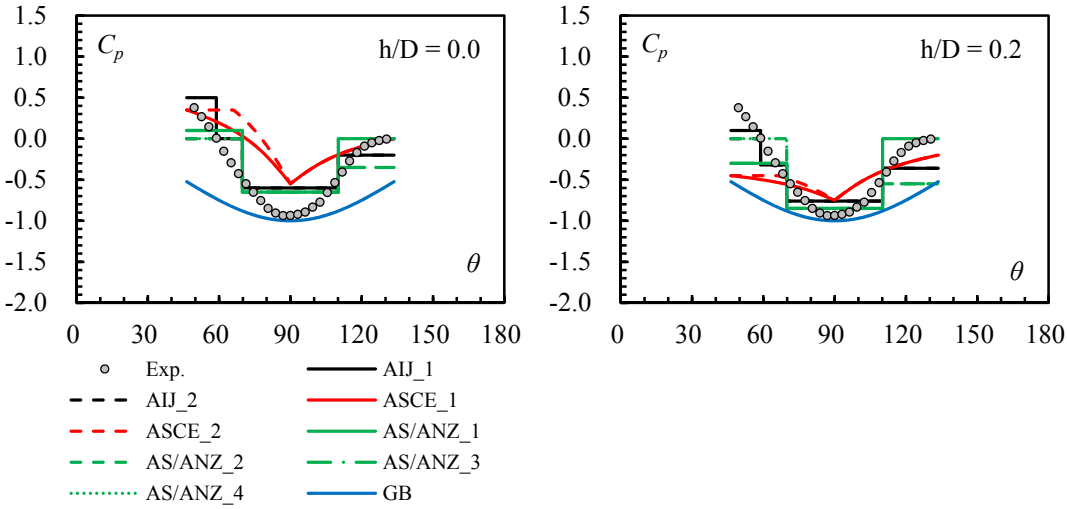
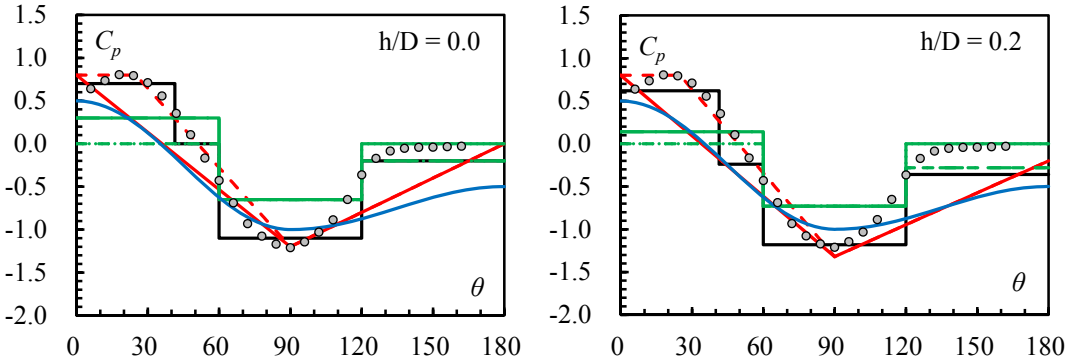


圖 8 平均風壓係數分布圖(風洞實驗結果)



(a) $f/D = 0.2$



(b) $f/D = 0.5$

圖 9 各國規範與風洞實驗結果比較

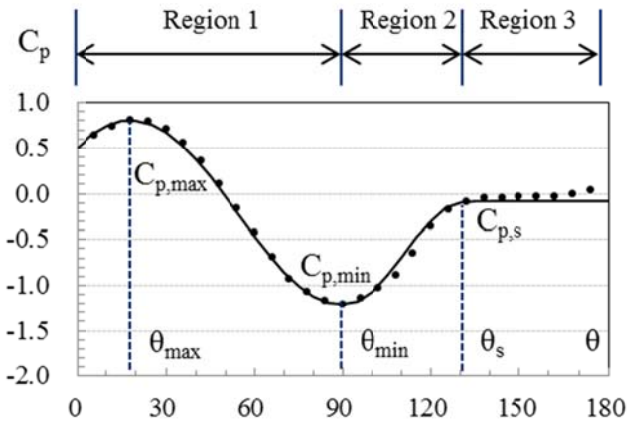


圖 10 Yeung[19]提出之平均風壓係數模式分區示意圖

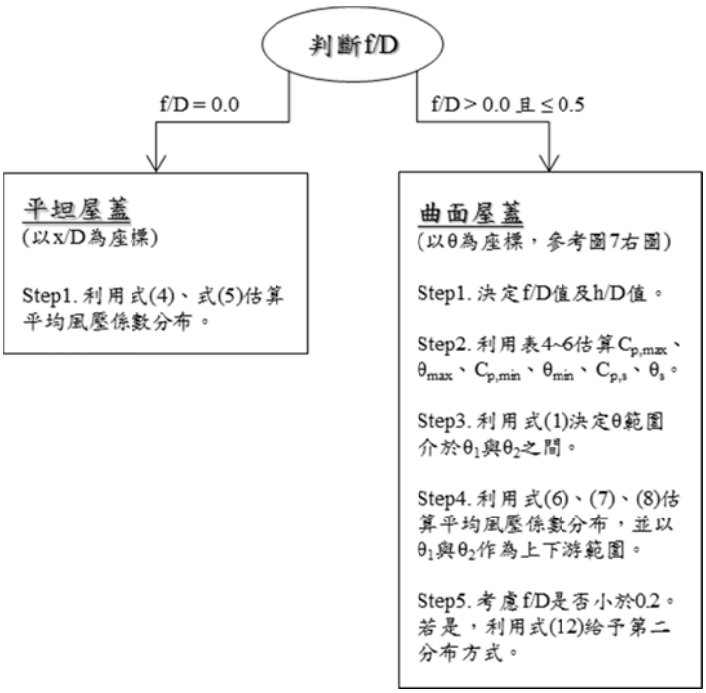


圖 11 初步模擬半圓頂型屋蓋結構平均風壓係數流程圖

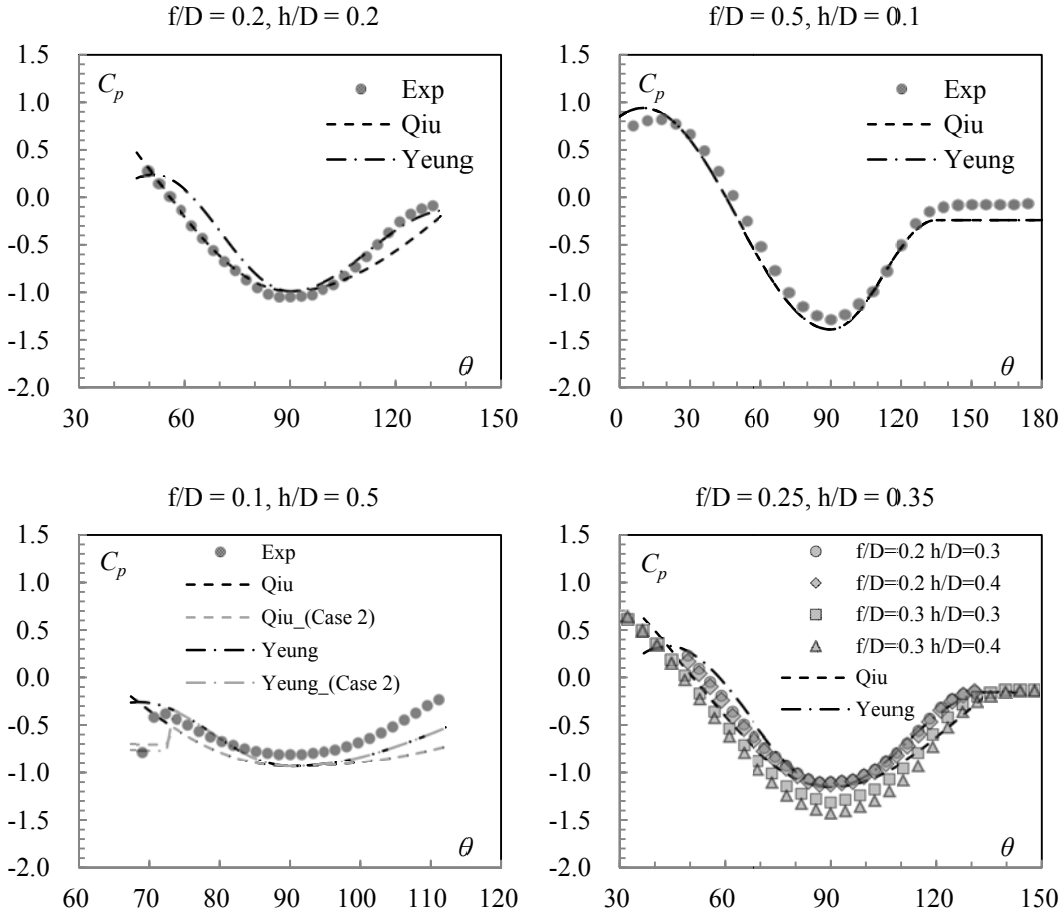


圖 12 Yeung[19]及 Qiu[11]模式與風洞實驗結果之比較

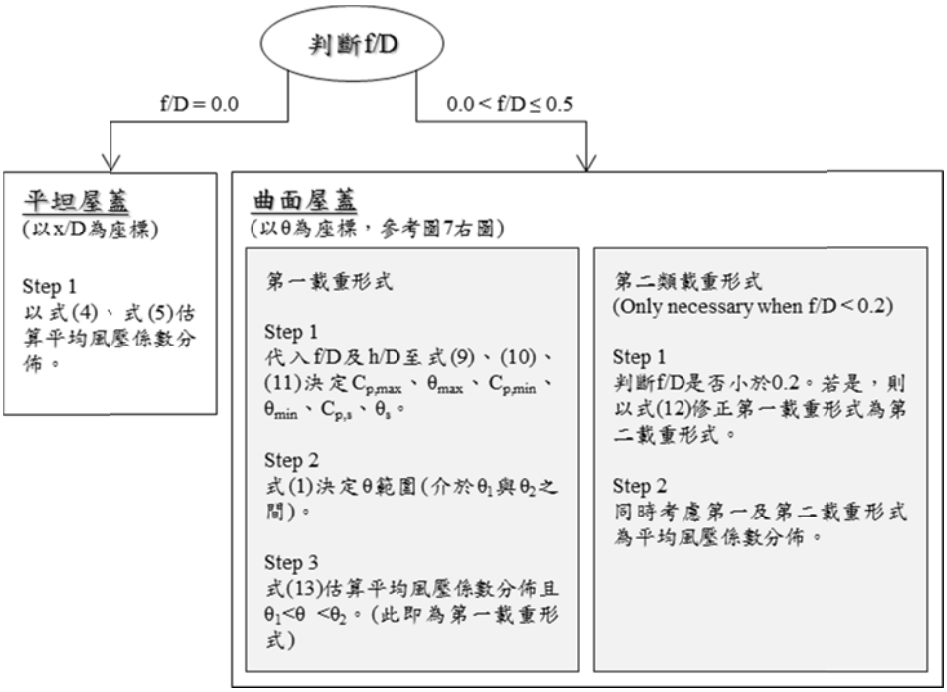


圖 13 本研究建議模擬半圓頂型屋蓋結構平均風壓係數流程圖

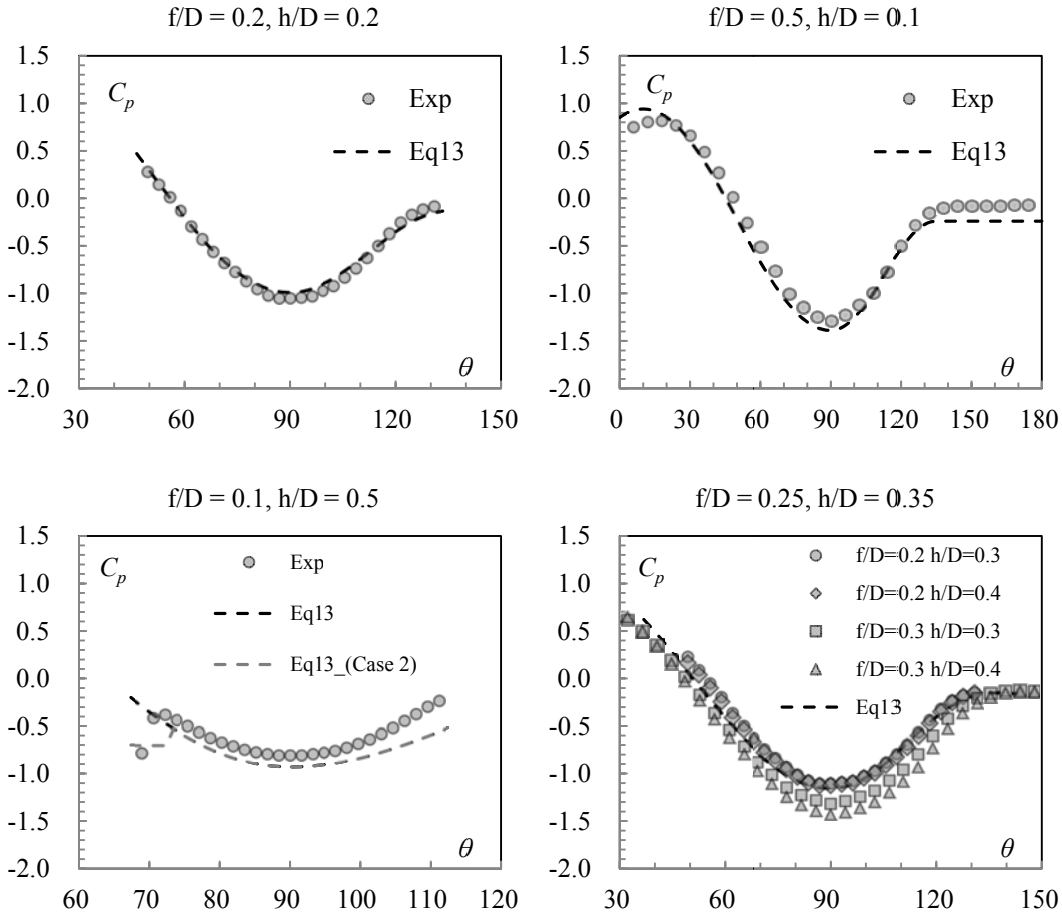


圖 14 本研究建議方案與風洞實驗結果之比較