

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

大跨徑屋蓋結構之氣動力特性與耐風設計
Investigation of aerodynamic characteristics and design wind load of
large span roof structures. (1/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 96-2221-E-032-022-MY3
執行期間：96年8月1日至97年7月31日

計畫主持人：鄭啟明
共同主持人：
計畫參與人員：陳正璋、陳昶志、洪詩珮、陳冠廷

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
 涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學土木系

中華民國 97年 6月 12日

大跨徑屋蓋結構之氣動力特性與耐風設計

中文摘要：

本計畫一方面是希望藉本研究能夠清楚的瞭解大跨徑屋蓋結構氣動力特性；另一方面希望藉由本研究，逐步建立實驗室的數值風工程(Computational Wind Engineering)計算能力，並希望藉由本計畫案，開始建立有關大型屋蓋結構的風壓風力數據庫，做為未來增修國內風力規範的參考依據。本計畫的另一項研究目標是大跨徑屋蓋結構的耐風設計，擬建置適於本研究所需的大跨徑屋蓋結構，進行下列研究探討：(i)進行結構動力分析，深入瞭解大跨徑屋蓋結構之動力特性，作為後續耐風研究之基礎；(ii)根據風洞實驗數據，進行完整的結構動力時域分析；(iii)探討以 POD 法與 LRC 法計算結構等值靜態設計風壓之可行性；(vi) 探討以模態分析法建構等值靜態設計風壓之合宜性。

本計畫同步採用風洞實驗物理模擬與 CFD 數值模擬，探討大跨徑屋蓋結構的氣動力特性，研擬大跨徑屋蓋結構設計風載重的計算方法。第一年的工作項目簡述如下：(1)選擇一特定大跨徑屋蓋結構分別以風洞試驗與 CFD 數值模擬探討大跨徑屋蓋結構之氣動力特性（包括曲面結構物之雷諾數效應），以 POD 法剖析表面風壓特性及其對於耐風設計的影響；(2) 以 FEM 探討大跨徑屋蓋結構之動力特性探討大跨徑屋蓋結構受風反應與耐風設計之重要參數比較模態分析(modal analysis)與直接積分法(direct integration)計算大跨徑屋蓋結構受風反應之差異。

關鍵詞:大跨徑屋蓋結構，空氣動力特性，風洞實驗，CFD 數值模擬，耐風設計

英文摘要：

This project uses both wind tunnel test and CFD simulation to investigate the aerodynamics of large span roof structures. The primary goal is to perform an in-depth study of the characteristics of the roof wind pressure. It is also important that this wind engineering laboratory can enhance its computational wind engineering capability through this research project. Furthermore, combining the wind tunnel test and CFD could produce better results on the roof wind pressure database which is essential to the future wind code development. The second important goal of this project is to develop the wind resistant design of large span roof structures. This project intends to construct complete finite element models of dome structures for following investigations: (i) dynamic characteristics of large span roof structures; (ii) wind effects on the structural behavior and element responses; (iii) based on the Proper Orthogonal Decomposition method and Load Response Correlation procedure, establishing an equivalent static design wind pressure procedure for the rigid type roof structures; (iv) by integrating the spectral analysis and dynamic modal analysis with the results of last item, producing an equivalent static design wind pressure procedure for the flexible type roof structures.

During the first year of this project, the research team has conducted in-detail wind tunnel investigation and initial CFD simulation on the aerodynamics of hemispherical dome, especially the Reynolds number effects on it. FE model of 4 domes has been built to study their dynamic characteristics.

Keywords:

Large Span Roof Structures, Aerodynamics, Wind Tunnel Test, CFD Simulation, Wind Resistant Design

一、前言

在近代都會區的建設中，大跨徑屋蓋結構是大型公共建築常見的建築形式之一。車站的站場、開放式運動場的頂棚、巨蛋式室內體育場等都屬於此類結構形式；某些廠房、機場的機棚等也屬於此類結構。大跨徑屋蓋結構由於具有較大的受風面積與無支撐面積，以及質量相對較輕的特性，因此許多時候，風力會超越地震力，成為設計時的主要荷載。在另一方面，大跨徑屋蓋結構的空氣動力特性與結構動力特性與一般建築結構有顯著的不同，因此耐風設計的方法也不盡相同。一般而言，建築結構的風力可區分為順風向、橫風向與扭轉向風力。其中，順風向與橫風向風力的相關性很弱，可視為相互獨立；扭轉向風力雖與橫風向風力有較佳的相關性，由於對大多數建築結構而言，扭轉向風力並非重要的設計因素，因此可以採用較為保守的「完全相關」作為設計的依據。大跨徑屋蓋結構通常並非柱體結構，因此所受的風力也無法簡單的區分為順風向、橫風向與扭轉向風力；不同的受風區域之間具有複雜的相關性。

就結構動力特性而言，多數建築物在 x 、 y 、 z 三軸向間的耦合現象並不明顯。因此以模態分析法(modal analysis)進行風力分析時，通常只需考慮各方向的第一個振態，而且可忽略振態耦合現象。大跨徑屋蓋結構的各個振態通常在 x 、 y 、 z 三軸向之間有顯著的耦合現象，而且各振態之間的自然頻率差距不大。因此，使用模態分析法時，必須選用多個相互耦合的振態，而且必須使用完整的機械阻抗矩陣，進行模態分析。除此之外，屋蓋結構的分離區附近，以巨蛋結構而言大約在接近曲面頂部位置，平均風壓接近零。若是採用陣風反應因子法，會嚴重低估該區域的設計風壓。我國實施的「建築物耐風設計規範與解說」中，對於圓頂結構僅有簡單的風力係數，該部分的圖表條文僅適用於一般尺度的剛性圓頂建築，並不適用於本研究案所擬探討的大跨徑屋蓋結構。因此建構大跨徑屋蓋結構的風壓風力資料庫做為未來修訂規範的參考依據，也是一項刻不容緩的工作。

二、研究計畫內容

本計畫擬針對大跨徑屋蓋結構的空氣動力特性與其耐風設計進行系統性的研究。預期在三年之間研究大跨徑屋蓋結構所受的風壓與風力特性；探討此類結構的動力特性與其對於耐風設計的影響；並結合前述研究結果，研擬大跨徑屋蓋結構設計風載重的計算方法。第一年期的工作項目簡述如下：

(一) 大跨徑屋蓋結構之氣動力特性研究 (I)：

選擇一特定大跨徑屋蓋結構分別以風洞試驗與 CFD 數值模擬探討大跨徑屋蓋結構之氣動力特性（包括曲面結構物之雷諾數效應），以 POD 法剖析表面風壓特性及其對於耐風設計的影響。

(二) 大跨徑屋蓋結構之 FEM 之動力分析：

以 FEM 探討大跨徑屋蓋結構之動力特性探討大跨徑屋蓋結構受風反應與耐風設計之重要參數比較模態分析(modal analysis)與直接積分法(direct integration)計算大跨徑屋蓋結構受風反應之差異。

三、大跨徑屋蓋結構之氣動力特性研究 (I)

3-1 以風洞試驗探討大跨徑屋蓋結構之氣動力特性（包括曲面結構物之雷諾數效應）

本研究之實驗，在長 24 公尺×寬 4 公尺×高 2.6 公尺之邊界層風洞執行，實驗並分別在平滑流場及邊界層流場進行。在平滑流場部分，將模型放置於離地高 35 公分平板處，以避免受到風洞地板產生之邊界層流影響。而在邊界層流部分則採用接近市郊地形，符合指數律 $\alpha = 0.27$ 之流場，該流場之紊流強度介於 7%~25%間。試驗模型則採用壓克力製半圓球模型，模

型底部直徑分別為 120 公分、50 公分及 20 公分。量測壓力位置沿著半球表面中心線平均分佈，另外 50 公分及 120 公分之半球，在垂直角度為 20、40、60 度處共三層，壓力孔沿水平向環繞球面平均分佈一圈。而 20 公分之半球，則在水平向分佈八層壓力孔位、涵蓋整個球面，主要作為研究球面整體壓力分佈狀況之用。實驗設置如圖 3-1、3-2 所示。



圖 3-1 半球體風壓量測-邊界層流場



圖 3-2 半球體風壓量測-平滑流場

實驗儀器則採用多頻道電子式風壓掃描器，用來同步擷取作用於結構表面各點的瞬時風壓，採樣頻率為 300Hz。而實驗規劃之雷諾數範圍如下表 3-1 所示。

表 3-1 風洞試驗規劃

	模型底部直徑	平滑流場 雷諾數	邊界層流場 雷諾數
Dome S	20cm	6.6×10^4 - 3.4×10^5	5.3×10^4 - 2.0×10^5
Dome M	50 cm	1.6×10^5 - 8.7×10^5	2.0×10^5 - 6.0×10^5
Dome L	120 cm	5.3×10^5 - 2.0×10^6	5.8×10^5 - 1.7×10^6

3-1-1 滑流場之實驗結果

如圖 3-3 所示，沿著半球表面中心線之平均壓力或擾動分佈，皆會隨著雷諾數改變，由圖 3-3 平均壓力分佈可看出當雷諾數介於 $6.7 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^5$ 時，半球最高點處之負壓隨著雷諾數增加而變大，但在下游區負壓則隨著雷諾數增加而變小。而在雷諾數為 $3.3 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^6$ 之間，尾跡區負壓隨著雷諾數增加再度增大，且分離點往前移動約 10 度左右。在擾動壓力部分，在半球前緣停滯點處有壓力明顯差異，主要是因不同模型受平板邊界層影響高度不同所致，此差異約在 45 度左右消失。另外，在雷諾數小於 2.0×10^5 ，在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 及 $110^\circ \sim 120^\circ$ 處擾動壓力有尖峰值出現，預測可能是氣流分離及再接觸點的位置。而當雷諾數大於 3.3×10^5 時，僅於 $110^\circ \sim 120^\circ$ 出現一個尖峰值。

另外在圖 3-4 所顯示阻力係數分佈顯示出當雷諾數小於 3.0×10^5 ，平均阻力係數隨雷諾數增加而減小，隨後再緩慢增加。另外，最大擾動阻力係數發生於雷諾數 1.5×10^5 之後迅速降低，至雷諾數 3.0×10^5 時降至最低點。

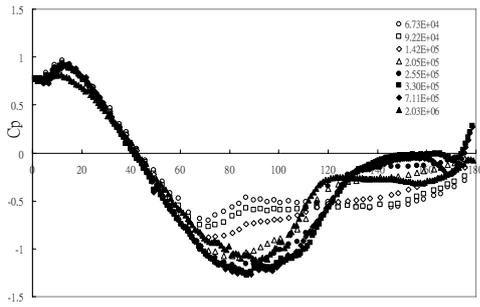


圖 3-3(a) 平滑流場之平均壓力分佈

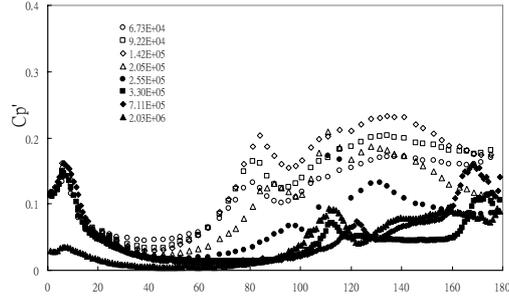


圖 3-3(b) 平滑流場之擾動壓力分佈

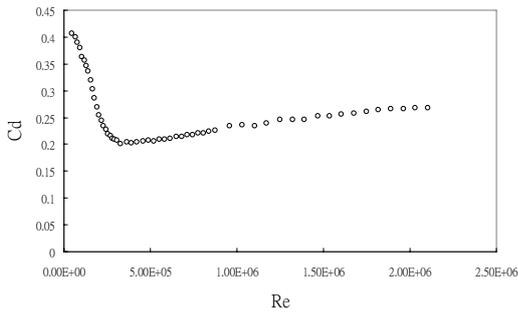


圖 3-4(a) 平均阻力係數

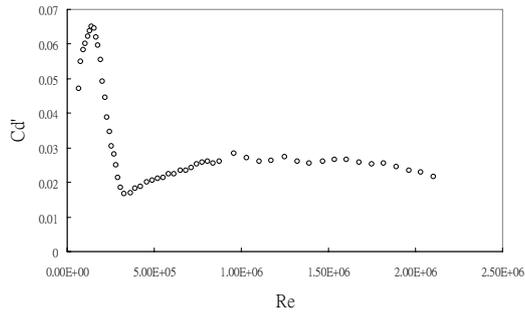


圖 3-4(b) 擾動阻力係數

3-1-2 紊流場之實驗結果

在紊流場下，沿著半球表面流動的氣流，會在較低的雷諾數下，發生流體過渡狀態，變成紊流而從半球體表面分離。經過仔細比較三組模型試驗結果後，發現當雷諾數大於 $1.5 \sim 2.0 \times 10^5$ ， C_p 及 C_p' 不因雷諾數變化而變化。

圖 3-5 表示邊界層流場下之阻力係數，當雷諾數小於 2×10^5 ，平均阻力係數隨雷諾數增加而減小，當雷諾數大於 2×10^5 ，平均阻力係數則幾乎保持定值。圖 3-5 中圓形空心標記代表原始之擾動阻力係數，其明顯差異主要來自於邊界層來流在每個高度上的紊流強度不同所致。而為消除不同紊流強度之影響，將原始之擾動阻力係數除以模型高度處之紊流強度，並將結果以圓形實心標記表示。在圖中則表示，當雷諾數大於 1.8×10^5 時，擾動阻力係數則維持不變。

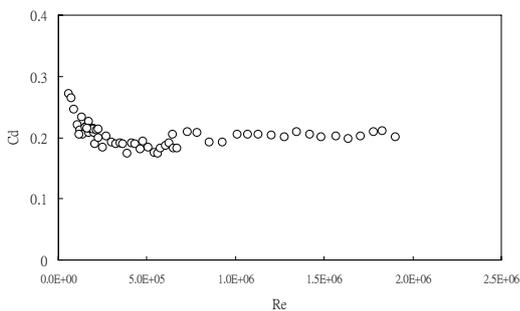


圖 3-5(a) 平均阻力係數

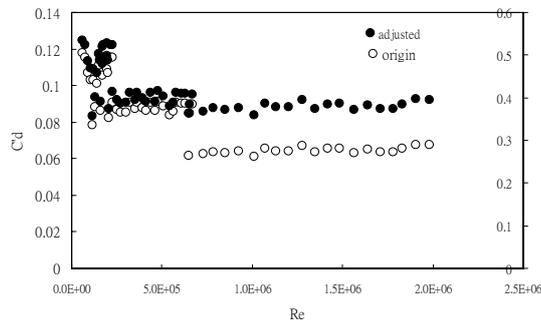


圖 3-5(b) 擾動阻力係數

3-2 以 CFD 數值模擬探討大跨徑屋蓋結構之氣動力特性

3-2-1 CFD 軟體

本研究將使用商業套裝軟體從事 CFD 模擬。本研究選用 FLUENT 套裝軟體進行求解與後處理部份，前處理部份則採用 ICEM-CFD 軟體進行建立模型及網格劃分。

3-2-2 紊流模式

因建築物大多處於大氣邊界層流場內，大氣邊界層流場依其逼近流狀況而有不同的風速剖面及紊流剖面，流體流經建築物後亦會形成各種不同之紊流狀況，故計算流體力學軟體會提供數種不同的紊流模式，而在此初步研究部分先採用 k-ε RNG 之紊流模式進行計算。

3-2-3 網格建置

ICEM-CFD 軟體是特別適用於計算流體力學的網格建置應用軟體。其網格產生器具備以參數化方式建立網格之能力。一般較常使用 HEXA 六面體網格模組及 TETRA 四面體網格模組。而在模擬時會以採用漸進加密方式生成網格。因大跨屋蓋結構上部為圓弧狀，在圓弧部份流場需進行較精細的計算，該處流場改變主要來自於壁面與流體間之粘滯力造成了能量改變，如果在近壁面部份，有更好的模擬，對於流場分離處之預測，應會更為準確。所以在近壁區域之網格上需有相當的密度，方能準確模擬到近壁區域的流場。目前網格約接近 100 萬個網格，計算域及網格劃分方式如下圖所示，半圓球底部直徑為 1 公尺，計算域長為 8 公尺，寬及高皆為 5 公尺，半球距入流端 2 公尺。

3-2-4 計算結果

初步研究先採用平滑流場作為入流條件，改變不同風速，使雷諾數範圍介於 $6 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ ，計算結果如圖 3-6 所示，在半圓球前半部之風壓，隨雷諾數增加而降低，但在尾跡區之風壓，隨雷諾數增加而變大。但當雷諾數大於 8×10^5 則風壓分佈幾乎不再隨雷諾數增大而變化。此結果與試驗結果趨勢一致，但試驗結果顯示，在 60° 以前之風壓幾乎不會隨雷諾數變化而改變，且在半球體頂部之風壓，隨雷諾數變化之幅度較大。另外，實驗值與數值模擬之結果所顯示之臨界雷諾數，亦有不同。故未來會針對網格劃分技巧及不同紊流模式，進行更多模擬，以加強數值模擬之能力及準確性。

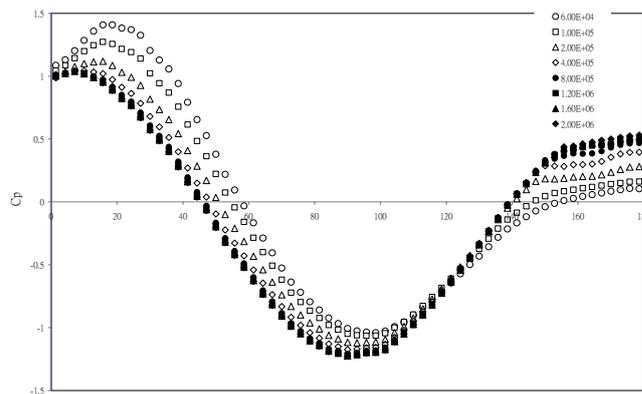


圖 3-6 平均風壓分佈隨雷諾數之變化-CFD 計算結果

四、大跨徑屋蓋結構之 FEM 之動力分析

4-1 以 FEM 探討大跨徑屋蓋結構之動力特性

本計畫所建置之構件以空間構件(space frame)為主。且結構系統採取圓弧曲面大跨徑屋蓋結構為主要分析對象。建立原型結構系統時，並需定義各物理參數以決定該原型結構系統所呈現之外觀。原型結構系統首先探討空間構件

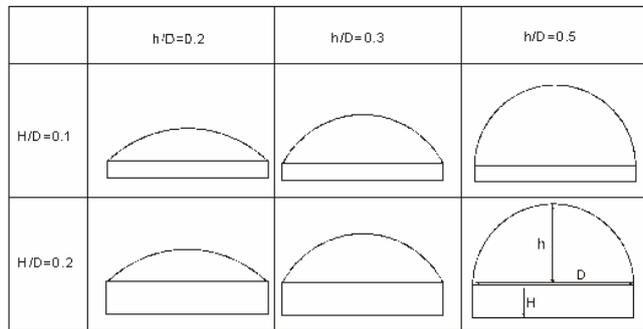


圖 4-1 本計畫曲面屋蓋模型之幾何參數。有限元素模型即為圖 4-2 所示。曲面屋蓋結構系統支撐柱高度部分在研究屋蓋部分的動力特性忽略不計。進行動力分析觀看其振態時，支撐柱部分可簡單視為剛性邊界條件。因此圖 4-2 有限元素模型中僅以屋蓋部分作為探討。並增加一組 $h/D=0.4$ 作為連續性觀察。



圖 4-2 曲面屋蓋結構系統模型。

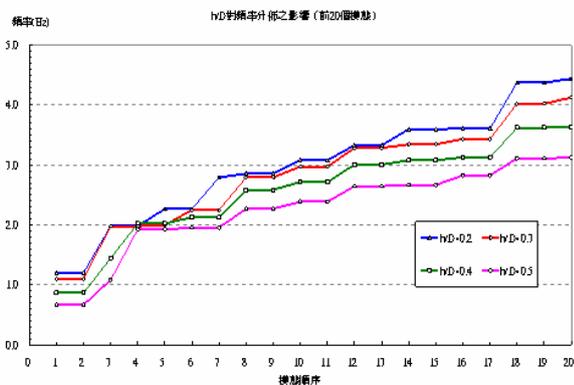


圖 4-3 各組前 20 個模態頻率分佈圖。如圖 4-2 所示 4 組曲面屋蓋屋蓋結構模型，其桿件粗細為求一般性故將桿件設為圓柱形；由下至上分成三區，桿件的粗細分別為直徑 0.25m、0.20m、0.15m。4 組模型的與地面相接處均設為剛接。欲觀看動力特性變化，本計畫採用有限元素分析軟體 MIADS/Gen 進行特徵值分析。分析所得 4 組各前 20 組詳細分佈如圖 4-3 所示。由圖 4-3 可得知，蛋形結構無論其 h/D 值為何，其趨勢呈現一連續性分佈。模態與模態間相似性高，在計算受風反應靜載重時，共振部分的計算必須考慮多組模態。四組 h/D 不同的結構振動模態中，共同趨勢顯示結構振態為曲面垂直方向的振態由低頻向高頻時，局部垂直振動區亦增多。隨著 h/D 值由小變大，振態中較為特殊的垂直向旋轉振態由 $h/D=0.2$ 的高頻振態（第七振態）移動至 $h/D=0.5$ 低頻振態（第三振態）。四組 h/D 的低階振態中，前兩振態均屬於整體偏向 X 或 Y 向。其中 $h/D=0.2$ 者，第一與第二振態類似突起或凹陷的形狀，而較不像整體偏向 X 或 Y 向的變形。若觀察四組的垂直方向振動模態，可發現 $h/D=0.2$ 的第一、二振態， $h/D=0.3$ 的第三、四振態， $h/D=0.4$ 的第四、五振態中， h/D 值越大者承受軸力勁度越大，故其振動頻率越高。若 h/D 逐漸變小， $h/D=0.1$ 所產生的第一、二振態將類似 $h/D=0.2$ 者，但其承受軸力能力變低，振動頻率也變小是可預期的現象。圖 4-4 列出四組不同 h/D 值的前兩模態形狀。

$h/D = 0.2$ $h/D = 0.3$ $h/D = 0.4$ $h/D = 0.5$
 1st 振動模態 1st 振動模態 1st 振動模態 1st 振動模態

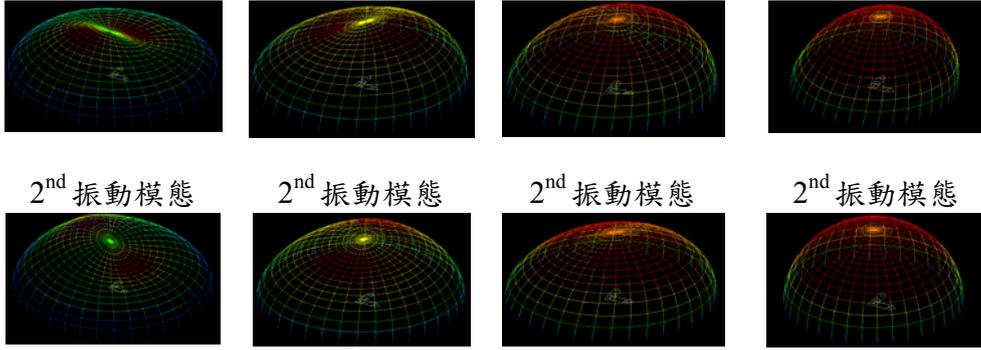


圖 4-4 四組不同 h/D 值的前 2 個模態圖

4-2 比較頻率域模態分析(modal analysis)與直接積分法(direct integration)計算大跨徑屋蓋結構受風反應之差異

一般來說結構物擾動反應可由結構物各振態在頻率域上進行模態疊加法或時間域上進行直接積分求得。時間域上一個 N 自由度結構物基本運動方程式如下：

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (4-1)$$

其中可將反應視為時間與空間分佈的函數並重新整理如下：

$$M_n \ddot{q}_n(t) + \sum_{r=1}^N C_{nr} \dot{q}_n(t) + K_n q_n(t) = P_n(t) \quad (4-2)$$

其中 $M_n = \phi_n^T m \phi_n$ 、 $K_n = \phi_n^T k \phi_n$ 和 $P_n(t) = \phi_n^T p(t)$ 稱為此多自由度系統的第 n 模態的廣義質量、廣義勁度及廣義外力。 $C_{nr} = \phi_n^T c \phi_r$ 為廣義阻尼，為一非對角線矩陣係數。若假設阻尼為古典阻尼，若 $n \neq r$ 則 $C_{nr} = 0$ 。因此 (4-2) 可重寫為：

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n(t) \quad (4-3)$$

N 自由度結構物反應可由 N 個單自由度系統經由 newmark- β 法直接積分計算後線性疊加而得。

不同於時間域上的分析，考慮頻率域分析時，系統所受的任意外力藉由傅立業轉換可由時間域轉換為頻率域上對各頻率的能量分佈。當廣義外力 $P_n(t)$ 非為週期性外力時，可由傅立業積分轉換為：

$$P_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_n(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad P_n(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_n(t) e^{-i\omega t} dt \quad (4-4)$$

系統在各種頻率分佈下的穩態反應可由機械轉換函數求得：

$$|H_n(\omega)|^2 = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (4-5)$$

其中 ω_n 表示第 n 個振態主要頻率。計算系統的廣義反應時，可經由每個振態的廣義外力頻譜和機械轉換函數相乘得到每個振態的廣義反應頻譜。反應頻譜對頻率積分後可求得其反應變異數，求取其均方根即為該振態的反應均方根值。

$$\sigma_n = \left(\int_0^{\infty} P_n(f) |H_n(f)|^2 df \right)^{1/2} \quad (4-6)$$

時間域上以直接積分法計算出各振態的反應歷時後，予以線性疊加即可獲得此一 N 自由度系統的總體反應。頻率域計算時，由於機械轉換函數僅考慮系統反應相對於各頻率分佈的最大值，且各振態互為正交獨立的假設前提下，一般以 SRSS 作為總系統反應的計算方式。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{r=1}^N \sigma_r^2} \quad (4-7)$$

以 $h/D=0.5$ 模型為例，進行地況 B 的風洞試驗量測風壓模型所受風壓外力。利用此外力歷時進行時間域直接積分動力分析以及頻率域模態疊加分析，並比較頻率域分析相較於直接積分

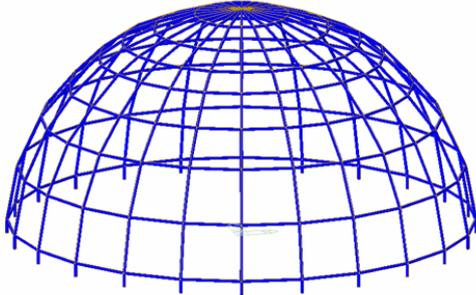


圖 4-5 $h/D=0.5$ 有限元素模型

分析有何差異及其缺點。有限元素模型如圖 4-5 所示，網格分佈如風壓模型風壓孔分佈，每個有限元素節點均為風壓模型壓力孔位置。有限模型跨徑 60 公尺，高約 30 公尺；風壓模型跨徑為 20 公分，高 10 公分；長度縮尺為 300。桿件設計為均一圓管斷面，直徑 0.4 公尺，厚 0.02 公尺。共 24 跨，8 層。利用有限分析軟體進行此有限元素模型特徵值分析，可得知該模型前六個振態頻率為 0.9849、0.9850、1.7117、3.1626、3.1681、3.4723Hz。

考慮此有限元素模型對應邊界層高度風速約為 73.46m/s。風洞試驗邊界層高度風壓約為 136.6N/m^2 ，則時間縮尺約為 62.14。風洞試驗風壓量測頻率為 300Hz 故實際有限模型的外力歷時時間間隔為 0.207 秒，即採樣頻率 4.831Hz。將風壓孔上所量測到的風壓歷時與風壓孔代表面積相乘後，重新分佈鋒利於有限模型節點上，即為式 (4-1) 之外力。風力歷時與各振態的模態相乘並將 XYZ 向的外力相加總和即為各振態的廣義外力，透過傅立葉轉換後可得到各振態的廣義外力頻譜。如圖 4-11 所示為前 6 個振態的廣義外力頻譜圖。各振態的機械轉換函數如式(4-5)代入前六組模態的主要振態頻率可求得如圖 4-7 所示。如圖 4-7 所示，頻率分佈僅為採樣頻率之半，2.414Hz。第 4 模態以後的主要頻率皆大於此範圍，因此第 4、5、6 振態機械轉換函數的尖峰值無法顯示出來，勢必對計算反應頻譜造成影響。根據式 (4-6) 計算前六個振態的反應頻譜，如圖 4-8 所示。受到機械轉換函數影響，第 4、5、6 振態反應頻譜對於總系統反應無尖峰值出現，即結構造成的共振部分響應不會產生。第三振態的外力頻譜因模態分佈為旋轉向，風力歷時對此旋轉向響應偏小，故造成反應頻譜能量分佈亦明顯偏小。根據式(4-7)對各振態反應頻譜積分後以 SRSS 方式相加可得系統的反應均方根值。

表 4-1 列出採用模態數目對頻率域分析方法所得的結果比較，以及利用時間域上對此系統進行直接積分後所得之結果。以傳統頻率域模態疊加法進行結構反應的分析，將系統模態視為兩兩獨立的單自由度系統計算並忽略系統的機械轉換函數矩陣中非對角耦合項的影響；以曲面屋蓋結構作為分析對象時，由於曲面屋蓋結構本身具有結構振態頻率連續性且無主導模態的特性下，頻率域分析的方式值得商榷。且大跨徑屋蓋結構受風力作用產生振動形式亦無法由頻率域分析準確得知。

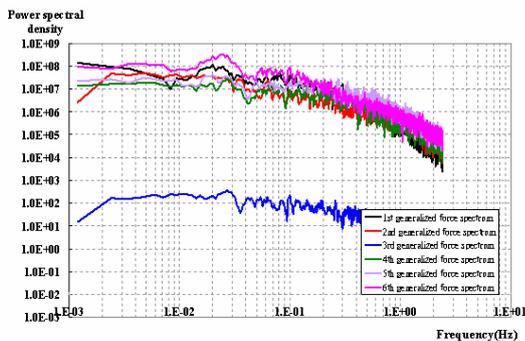


圖 4-6 前六組振態廣義外力頻譜圖

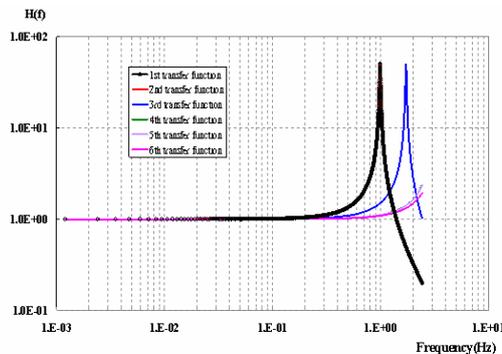


圖 4-7 前六組振態機械轉換函數

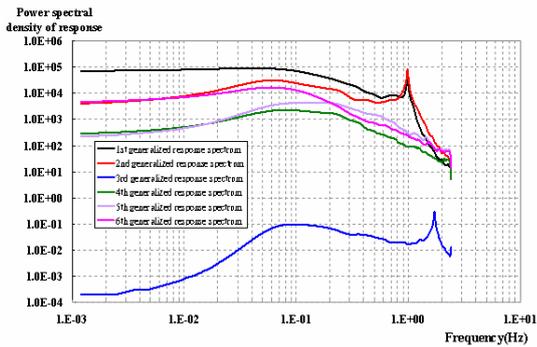


圖 4-8 前六組振態反應頻譜圖

表 4-1 h/D=0.5 模型頂點位移反應均方根值比較 (單位：公尺)

模態數目	σ_x	σ_y	σ_z
1	0	0.7788	0
3	0.5027	0.7788	0
10	0.5078	0.7800	0
20	0.5090	0.7803	0.0021
50	0.6032	0.7803	0.0052
	σ_x	σ_y	σ_z
直接積分	0.6651	0.7045	0.0045

五、結論

由目前之研究結果可得下列初步結論：

1. 在平滑流場中，形成過渡狀態的分離流會在雷諾數等於 2.7×10^5 時產生；而在紊流場中，會在較低雷諾數（約 $9.7 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$ ）發生此狀態。
2. 在平滑流場中，當雷諾數小於 3.0×10^5 ，平均阻力係數隨雷諾數增加而減小，隨後再緩慢增加。最大擾動阻力係數發生於雷諾數 1.5×10^5 之後迅速降低，至雷諾數 3.0×10^5 時降至最低點。在邊界層流場下，當雷諾數大於 2×10^5 ，平均及擾動阻力係數則幾乎保持定值。
3. 本研究選用 FLUENT 套裝軟體進行求解與後處理部份，前處理部份則採用 ICFM-CFD 軟體進行建立模型及網格劃分。以平滑流場作為入流條件，雷諾數範圍介於 $6 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ ，雷諾數對於風壓影響的趨勢，與風洞試驗結果大體上一致。
4. 本文針對四種曲面屋蓋結構， $h/D=0.2、0.3、0.4、0.5$ ，建構原型結構系統。探討其動力特性。曲面屋蓋結構無論其 h/D 值為何，其趨勢呈現一連續性分佈。
5. 以傳統頻率域模態疊加法進行結構反應的分析，將系統模態視為兩兩獨立的單自由度系統計算並忽略系統的機械轉換函數矩陣中非對角耦合項的影響，其結果與直接積分法有一定程度的差距。

六、參考文獻

1. Taylor, T.J., 1992, "Wind pressures on a hemispherical dome", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 40, 199-213.
2. Tsugawa, T., T. Hongo & M. Suzuki, 1992, "Experimental study of wind pressure and wind force characteristics on dome shaped openable roofs", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 42, 1509-1510.
3. Kawamura, S., T. Kiuchi & T. Mochizuki, 1992, "Characteristics of wind pressure acting on spatial large dome", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 42, 1511-1512.
4. Ginger J.D., "Wind load and response of grandstand roofs", Texas Tech University. Wind Science & Engineering, pp. 1603~1610.
5. Uematsu Y., Yamada M., Inoue A., Hongo T., 1997 "Wind loads and wind-induced dynamic behavior of a single-layer latticed dome", J. wind Eng. Ind.

七、計畫成果自評

本計畫研究執行狀況符合原訂進度，部分研究內容已撰寫論文預定發表於 2008/7 在 Milan/Italy 舉辦之 BBAA VII International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications；部分研究內容正撰寫 2008/11 於台北舉辦之 EASEC-11 研討會論文。