

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第三名

040113

四平八穩-建築物的流體力學效應

學校名稱：臺北市立中山女子高級中學

作者： 高二 武君玲	指導老師： 徐意娟
---------------	--------------

關鍵詞：流體力學、白努力原理、雷諾數

作品名稱：四平八穩 - 建築物的流體力學效應

壹、摘要

此實驗是將模型置於風洞中，藉由風洞模擬真實流場，及利用皮托管壓力計測量壓力值，並用風洞的煙線產生器觀察流線的變化。實驗中調整風洞風速為 1.0m/s、3.2m/s、5.3m/s、7.4m/s，以風速算出雷諾數值，以找出應有的流場分布，與測得的壓力分布圖加以比較；並利用白蠟油產生煙線將風洞內的真實流場具體化。

實驗中所有情況的雷諾數皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，依照資料，此時空氣會有剝離現象(分離點)，且分離點會向風的來向移動，從實驗數據中皆可看到，在數據中的最低壓便是分離點。所有模型因橫切面皆為對稱形(正方形)，所以壓力分布會對稱。

拍攝煙線結果發現，金字塔、正立方體及長方體在背風面皆有渦流產生(當高度越大時渦流越大)，但是僅有正立方體與長方體的正面下方有渦流。因為長方體的背風面渦流較大，依此結果可暫時推測長方體的背風面最不穩定。

貳、研究動機

一日，在閱讀梁實秋教授所著的千年一嘆時，書中拍攝了兩種形狀不同的金字塔(圖一、圖二)，兩者在風的吹拂下風蝕程度不同，我對此感到好奇!所以希望設計了一個實驗來了解此情況。

之後，在閱讀文獻及資料時也發現，有資料(資料來源三)提及金字塔在強風的吹拂下較不易倒，這使我感到極大的好奇，難道結構對稱



圖(一) 普通金字塔

圖(二) 階梯式金字塔

的正立方體不會更穩定嗎？長方體不也是今日到處都有的建築形狀嗎？在閱讀此書的同時，老師正好也在教白努力原理，所以我很好奇，說不定這跟白努力原理有些關係。

參、研究目的

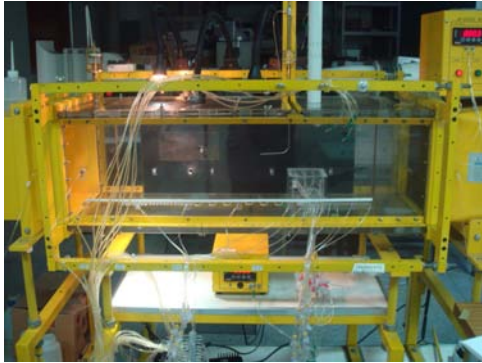
- 一、藉由煙線觀察不同形狀模型附近的流場變化，並加以比較。
- 二、測量不同風流速下，不同形狀模型四周壓力分布的關係。
- 三、比較不同模型的流場分布。

肆、研究設備及器材

一、研究設備

- (一) 風洞：實驗所用風洞系統為 LW-9300 Open-circuit Subsonic Wind Tunnel。(圖三)
- (二) 煙線產生器：觀察流場的變化。
- (三) 皮托管壓力計：測量局部區域的壓力值。

(四) 壓力管組：含針頭、壓力管、三向閥。(圖四)



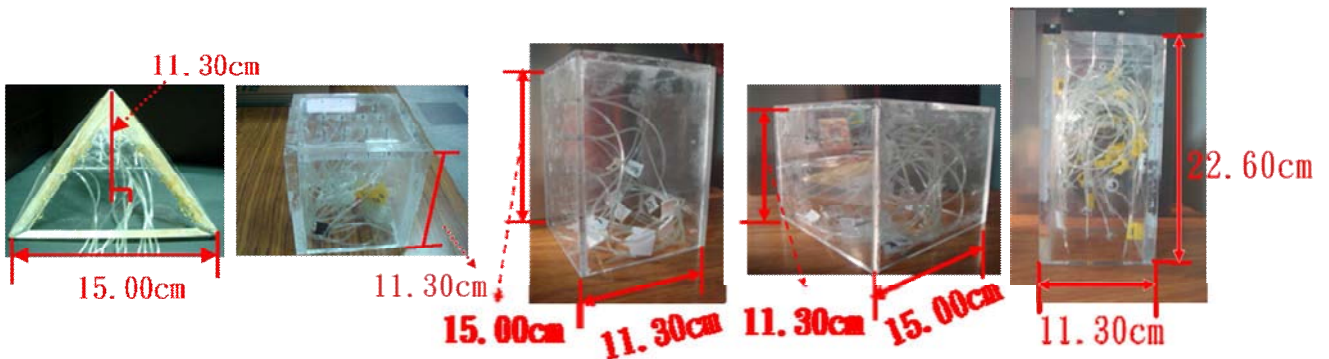
圖(三) 風洞系統



圖(四) 壓力管組

二、實驗模型

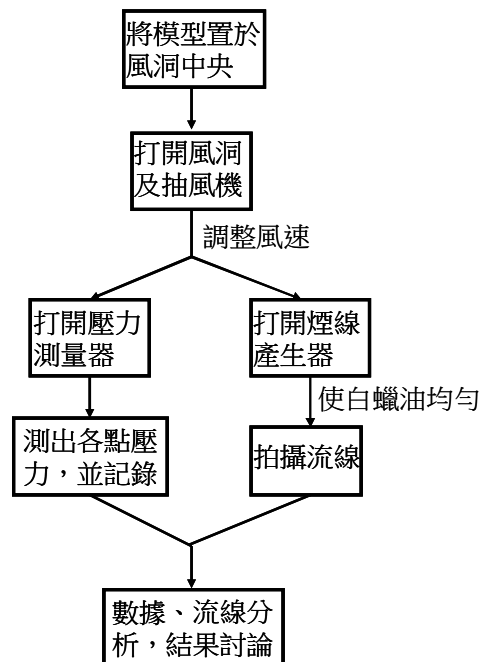
金字塔、正立方體與長方體模型。[三者底面皆為正方形，且受風面皆為四面]



圖(五) 實驗模型示意圖

伍、研究過程或方法

一、研究過程



圖(六) 流程圖

二、研究方法

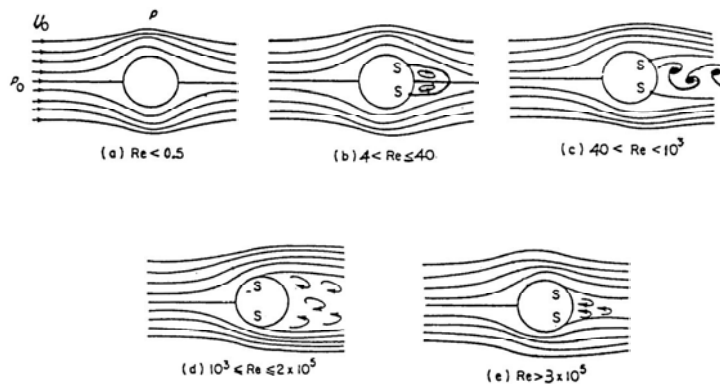
(一)雷諾數

流體在流動時受到兩力的作用：慣性力及黏性力。雷諾數為一個無因次量，它常被拿來區分流體在不同狀況下的不同表現：

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{黏性力}} = \frac{\rho VL}{\mu}$$

其中 ρ 為流體密度， L 為物體長度， V 為流速， μ 為動力黏滯係數。

以圓柱為例，在不同雷諾數下流體會有不同的表現，如圖(七)所示：當 $Re < 0.5$ 時，流場穩定且平穩，此時穩定的流線稱為層流； $4 < Re \leq 40$ 時，流線由於邊界層(真實流場中，因黏滯力影響，而在物體邊緣產生的一薄層)剝離的因素開始自分離點(圖中 s 點)分離； $40 < Re < 10^3$ 時，在圓柱後的分離流內剝離出一前一後的渦流； $10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 時，一前一後剝離的渦流開始轉變成尾流(wake)，此時的分離點較之前 Re 較小時，更靠近風的來向處；當 $Re > 3 \times 10^5$ 時，原本各自能量獨立的層流(laminar flow)在高速之下能量互相傳遞，形成紊流層(Turbulent boundary layer)。

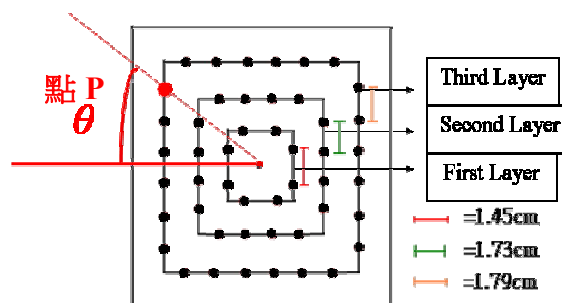


圖(七) 不同雷諾數下圓柱體附近流場表現示意圖

(二)白努力方程式

1738年由白努力(Daniel Bernoulli)導出。將力學能守恆原理應用於理想流體之任意流管，可得白努力方程式： $P + 1/2 \rho v^2 + \rho gh = \text{定值}$ ，進而推導出 $\frac{1}{2} \rho v^2 = \Delta p$ ， ρ 為流體密度， v 為流速， Δp 為空氣流動時與空氣靜止時之壓差，稱為動壓。

(三)角度定義



圖(八) 金字塔鑽洞示意圖(俯視)

為了畫出模型周圍流場的壓力分布圖，定義出角度以表示各點位置。如圖八，將模型投

影於水平面，圖中各點表示模型上鑽孔的位置。若以左側為受風面，作受風面的中垂線為基準線，則圖中點P所代表角度 θ 之值為：作點P與底面重心連線，此線與基準線的夾角 θ ，即為此點角度。逆時針為正，順時針為負。正立方體與長方體模型的角度定義與上述同。

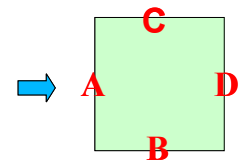
陸、研究結果

實驗中所使用皮托管壓力計，顯示數值的最小位數為小數第一位，故誤差值在 ± 0.1 間。

一、金字塔模型於不同流速下壓差之關係

實驗中改變四種不同轉速，分別為 1.0m/s、3.2m/s、5.3m/s、7.4m/s，並利用皮託管測量壓力，圖表橫座標皆為角度(如上定義)，縱座標為此時的壓力計顯示壓力。

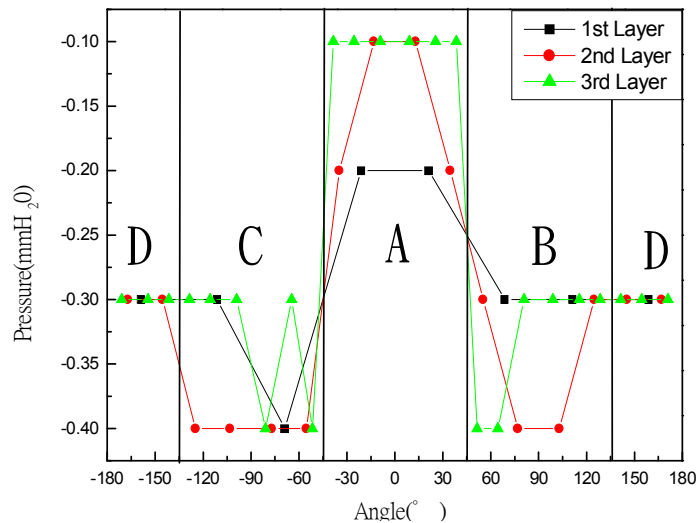
圖表中 A、B、C、D 為模型的四個面，如圖九，若以箭頭作為風的來向，則各面定義如圖。



圖(九) 各面定義圖

(一)風速為 1.0m/s 時的情形

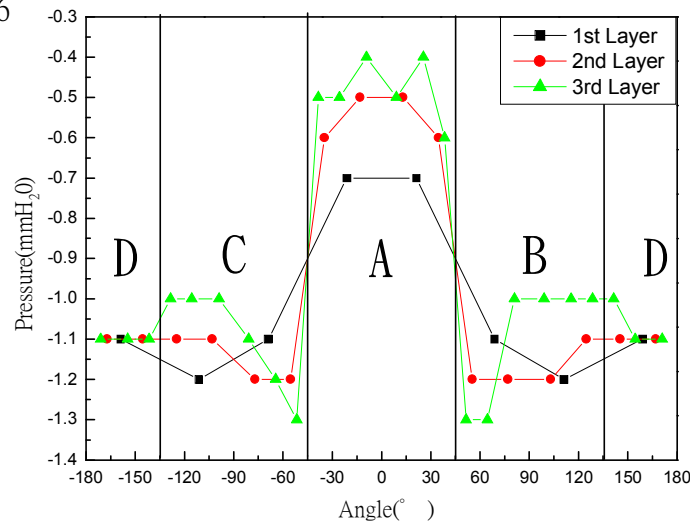
Re=9573.7750



圖(十) 風速為 1.0m/s 時，金字塔各點壓力分布圖

(二)風速為 3.2m/s 時的情形

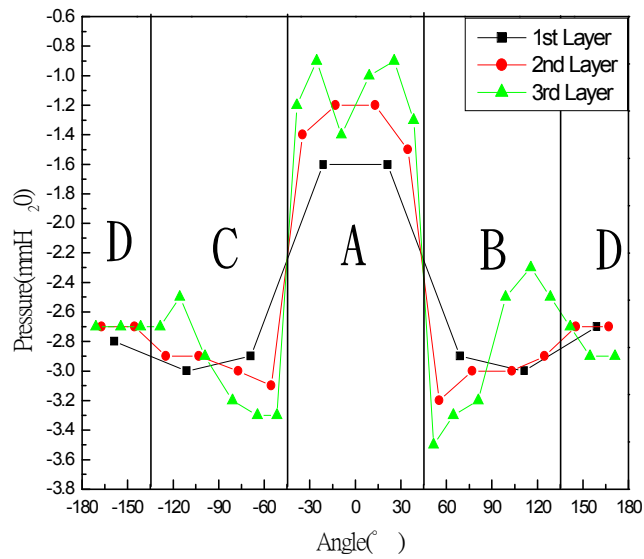
Re=30636.0656



圖(十一) 風速為 3.2m/s 時，金字塔各點壓力分布圖

(三)風速為 5.4m/s 時的情形

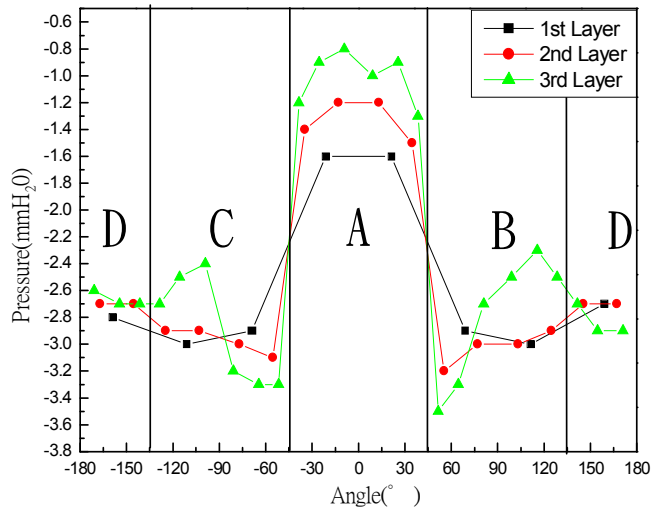
Re=50740.98361



圖(十二) 風速為 5.4m/s 時，金字塔各點壓力分布圖

(四)風速為 7.4m/s 時的情形

Re=70845.90164



圖(十三) 風速為 7.4m/s 時，金字塔各點壓力分布圖

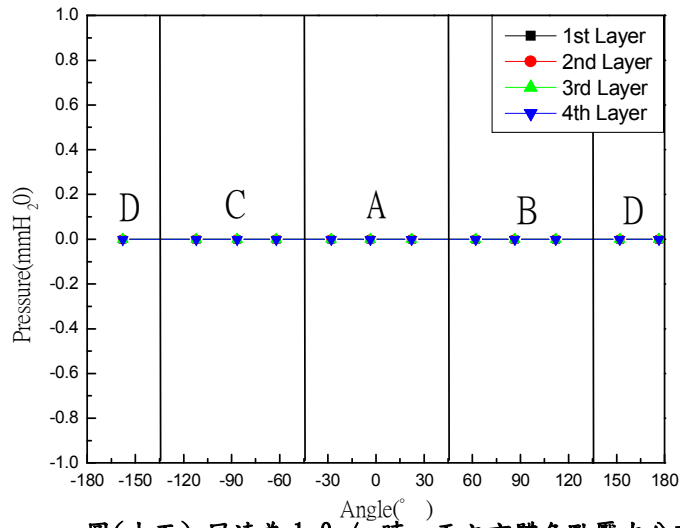


圖(十四)金字塔周圍流場煙線圖

二、正立方體模型於不同流速下壓差之關係

(一)風速為 1.0m/s 時的情形

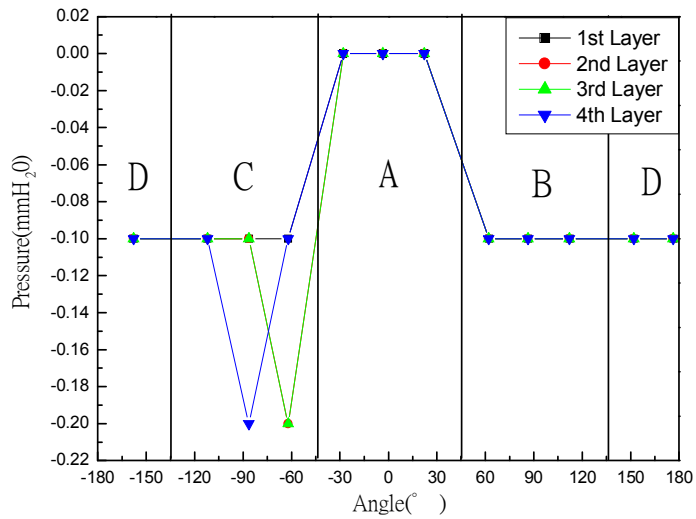
Re= 9787.7095



圖(十五) 風速為 1.0m/s 時，正立方體各點壓力分布圖

(二)風速為 3.2 m/s 時的情形

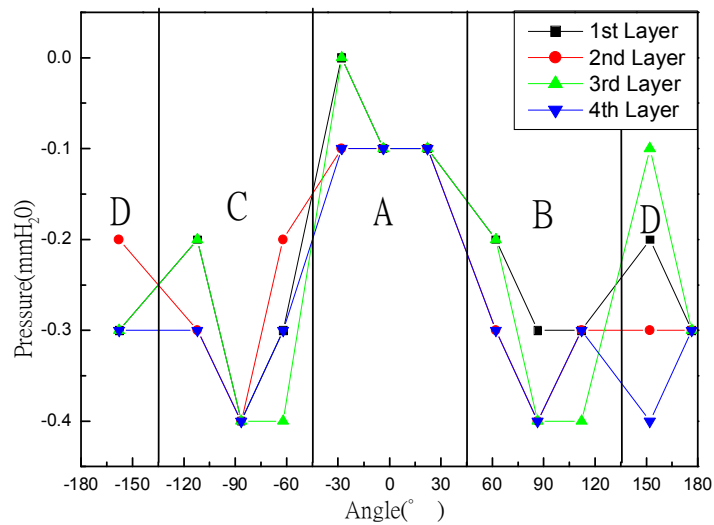
Re= 31320.6704



圖(十六) 風速為 3.2m/s 時，正立方體各點壓力分布圖

(三)風速為 5.4m/s 時的情形

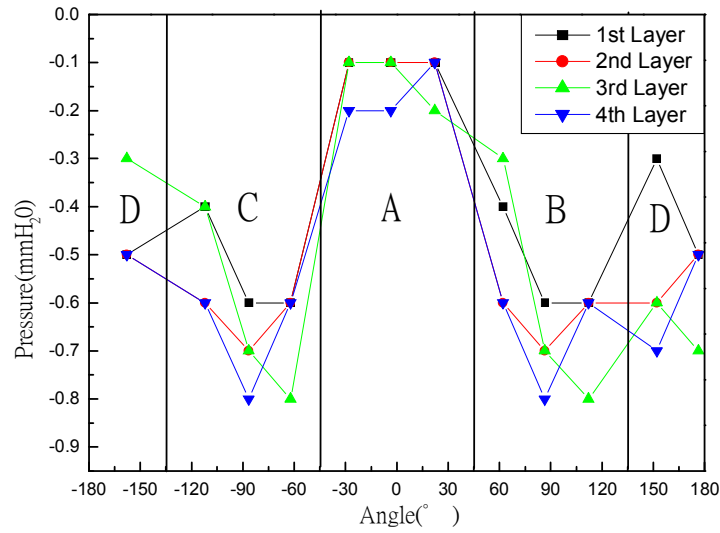
Re= 51874.8603



圖(十七) 風速為 5.3m/s 時，正立方體各點壓力分布圖

(四)風速為 7.4 時的情形

Re= 72429.0503



圖(十八) 風速為 7.4 時，正立方體各點壓力分布圖

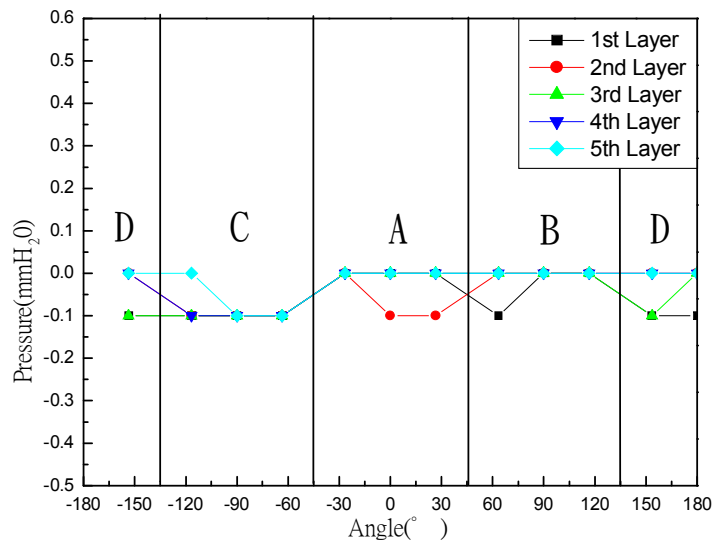


圖(十九) 正立方體周圍流場煙線圖

三、長方體模型 C 於不同流速下壓差之關係

(一)風速為 1.0m/s 時的情形

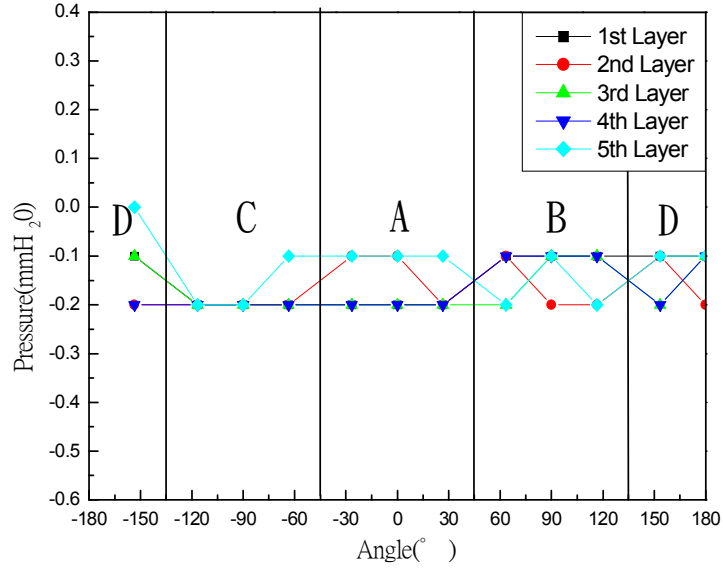
Re= 9787.7095



圖(二十) 風速為 1.0m/s 時，模型 C 各點壓力分布圖

(二)風速為 3.2m/s 時的情形

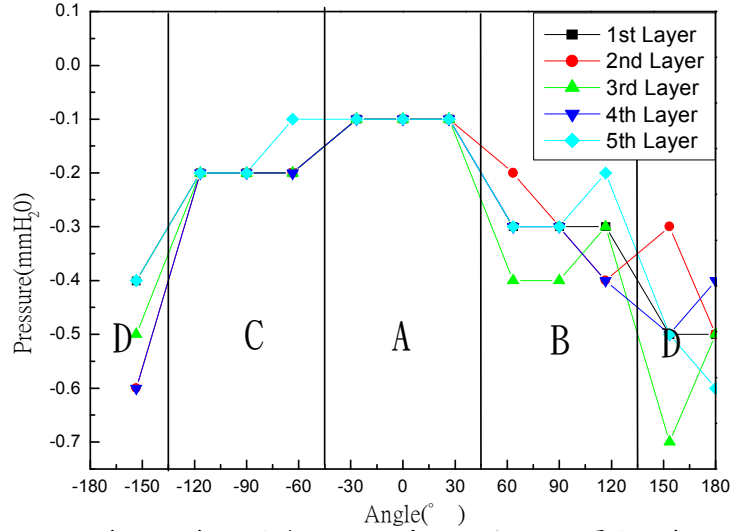
Re= 31320.6704



圖(二十一) 風速為 3.2m/s 時，模型 C 各點壓力分布圖

(三)風速為 5.3m/s 時的情形

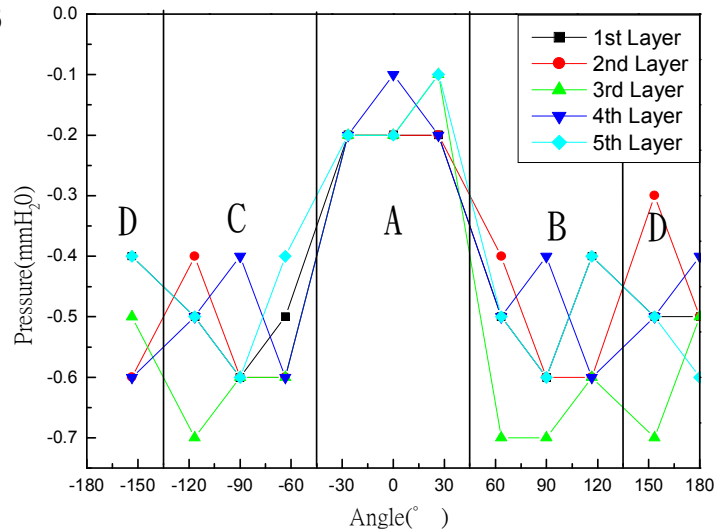
Re= 51874.8603



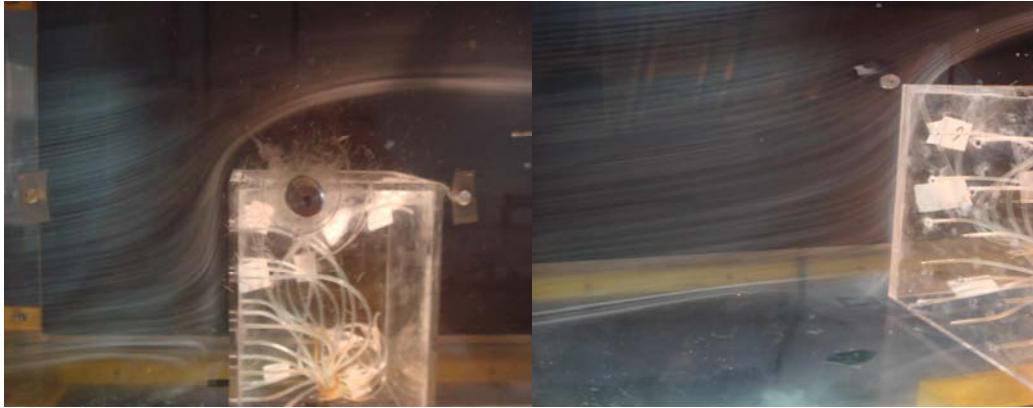
圖(二十二) 風速為 5.3m/s 時，模型 C 各點壓力分布圖

(四)風速為 7.4m/s 時的情形

Re= 72429.0503



圖(二十三) 風速為 7.4m/s 時，模型 C 各點壓力分布圖

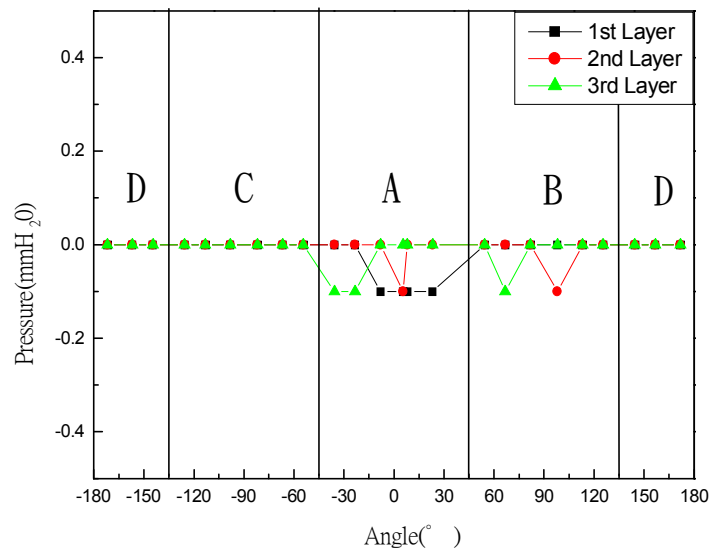


圖(二十四) 模型 C 周圍流場煙線圖

三、長方體模型 D 於不同流速下壓差之關係

(一)風速為 1.0m/s 時的情形

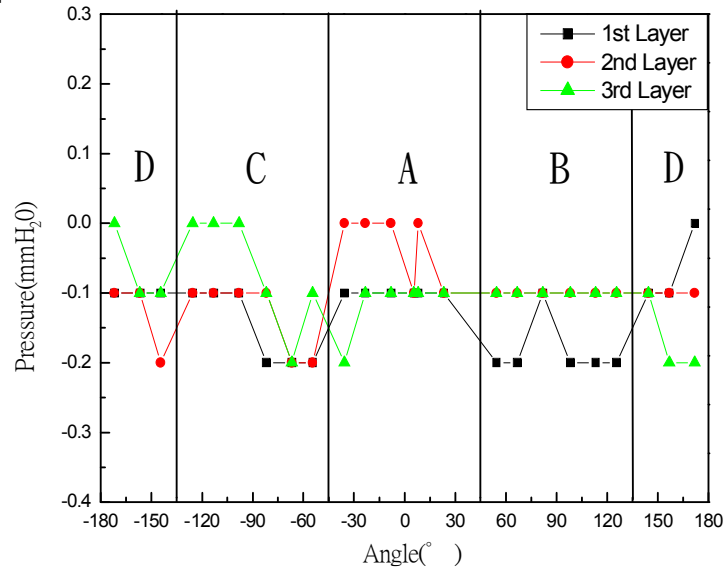
$$Re = 9787.7095$$



圖(二十五) 風速為 1.0m/s 時，模型 D 各點壓力分布圖

(二)風速為 3.2m/s 時的情形

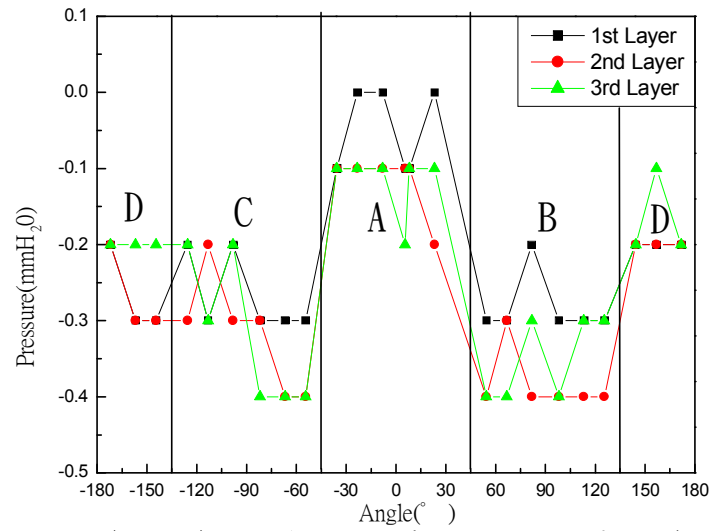
$$Re = 31320.6704$$



圖(二十六) 風速為 3.2m/s 時，模型 D 各點壓力分布圖

(三)風速為 5.3m/s 時的情形

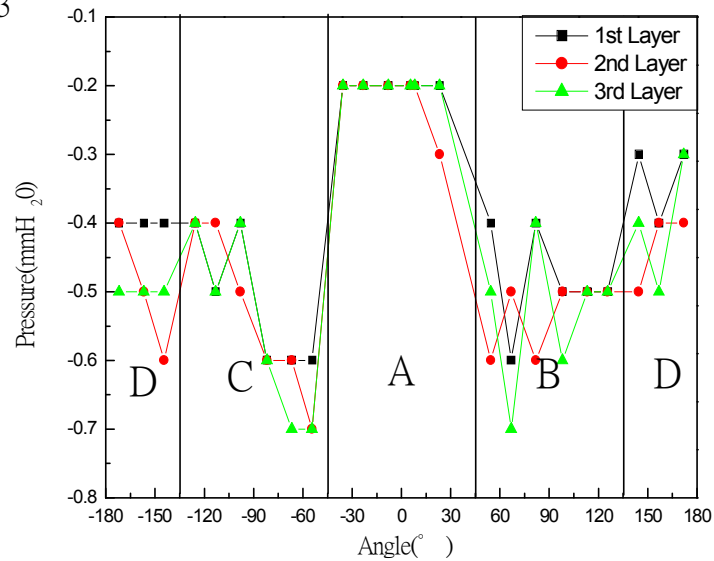
Re= 51874.8603



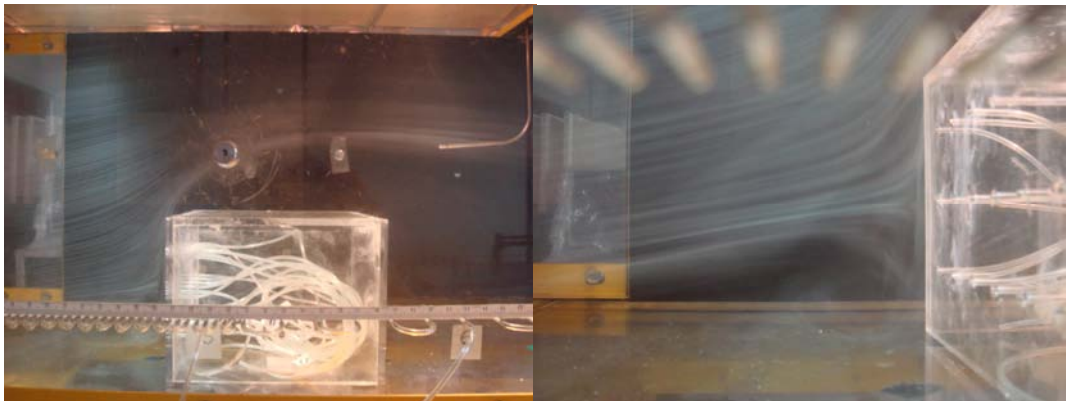
圖(二十七) 風速為 5.3m/s 時，模型 D 各點壓力分布圖

(四)風速為 7.4m/s 時的情形

Re= 72429.0503



圖(二十八) 風速為 7.4m/s 時，模型 D 各點壓力分布圖

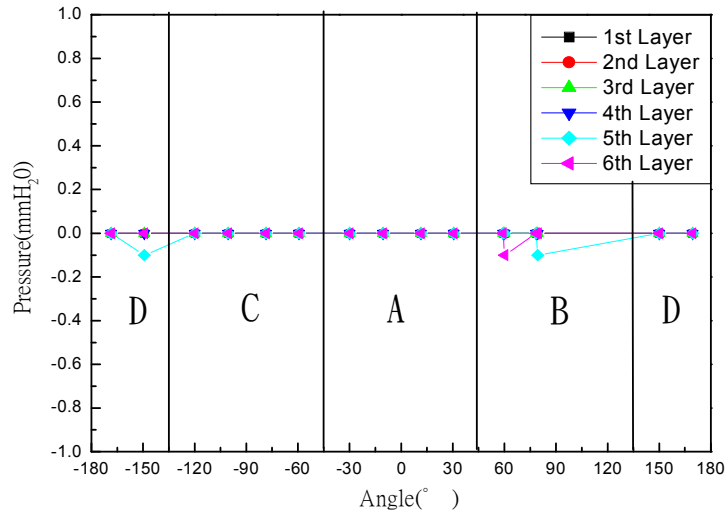


圖(二十九) 模型 D 周圍流場煙線圖

三、長方體模型 E 於不同流速下壓差之關係

(一)風速為 1.0m/s 時的情形

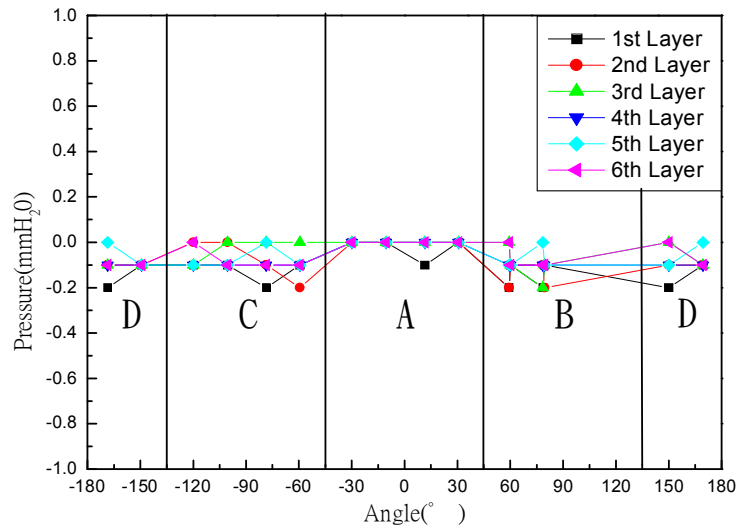
Re= 9787.7095



圖(三十) 風速為 1.0m/s 時，模型 E 各點壓力分布圖

(二)風速為 3.2m/s 時的情形

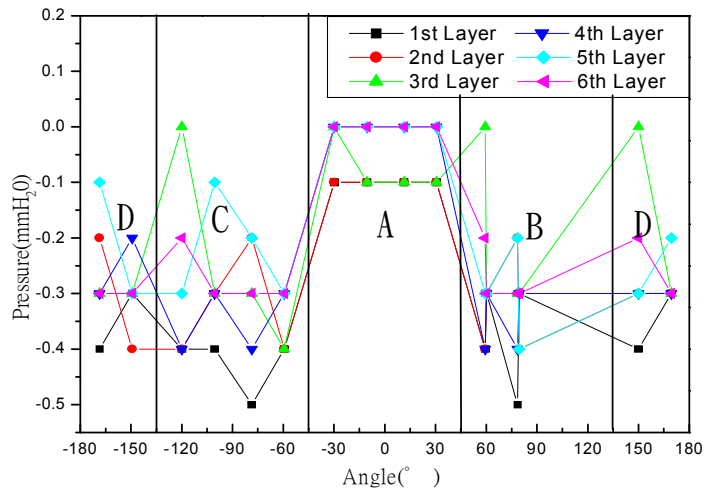
Re= 31320.6704



圖(三十一) 風速為 3.2m/s 時，模型 E 各點壓力分布圖

(三)風速為 5.3m/s 時的情形

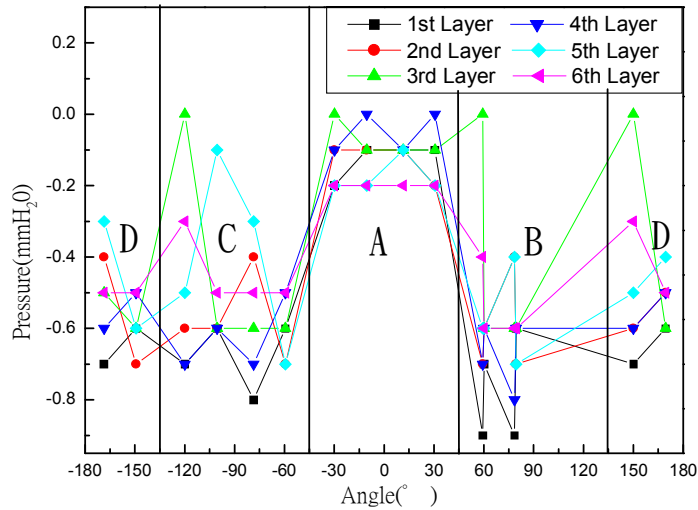
Re= 51874.8603



圖(三十二) 風速為 5.3m/s 時，模型 E 各點壓力分布圖

(四)風速為 7.4m/s 時的情形

Re= 72429.0503



圖(三十三) 風速為 7.4m/s 時，模型 E 各點壓力分布圖



圖(三十四) 模型 E 周圍流場煙線圖

柒、討論

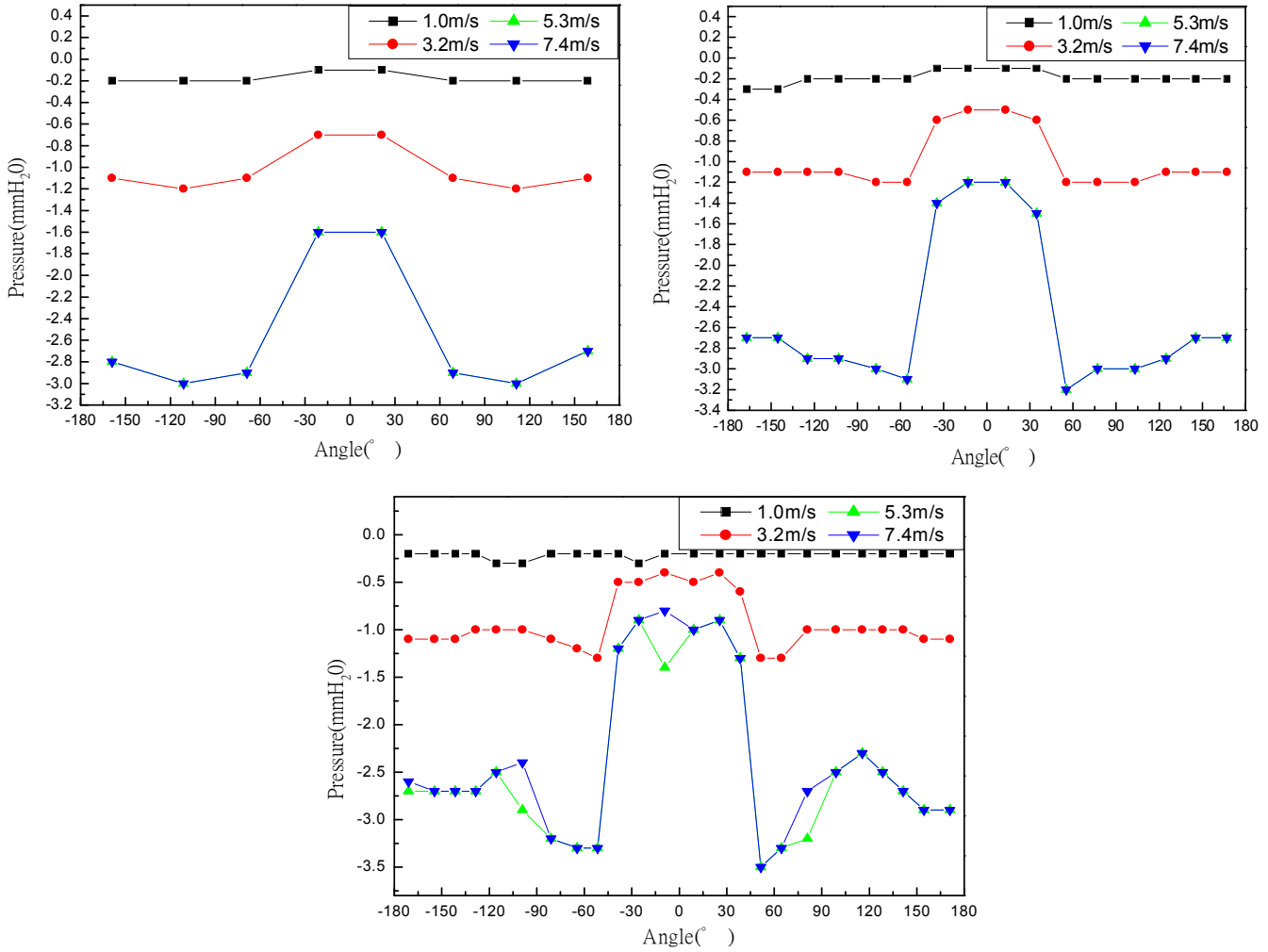
一、金字塔數據

在四個轉速下所測出的雷諾數值皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，比較圖(七)後可知，流場中應會有分離點及渦流的情況。

從圖(十)~圖(十三)可明顯看出，圖中 $\pm 60^\circ$ 的位置處，皆出現壓力的最低值，此即分離點的位置，這是因為此時邊界層剝離，造成此處位置皆無流線，進而影響壓力值。分離點位置出現在 $\pm 60^\circ$ ，是因為當雷諾數值介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，分離點的位置會向風的來向處移動。

圖(十)~圖(十三)數據大約是左右對稱，是因為金字塔的橫切面為對稱形(正方形)，但後三圖中在 $\pm 120^\circ$ 後有較不對稱的情況出現，推測是兩個原因造成：首先，是因為此時流場的背風面會有小的尾流；再者，因為金字塔的背面出現渦流會影響流場的對稱性(見圖十四)。

圖(三十五)為金字塔同一層在不同流速下的壓力分布圖，從圖中我們可以發現三件事：當流速越高時，壓力的最大值與壓力最低值間的壓差會越大；但是不論在任何流速下，壓力的趨勢是相近的；我們還能發現不管在任何層，流速越大時，整體的壓力趨勢會越明顯。



圖(三十五) 金字塔第一層(左上)、第二層(右上)、第三層(下)於不同轉速下壓力比較圖

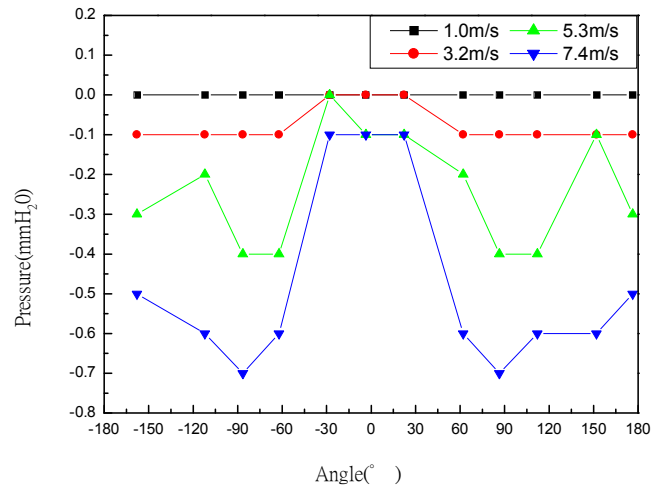
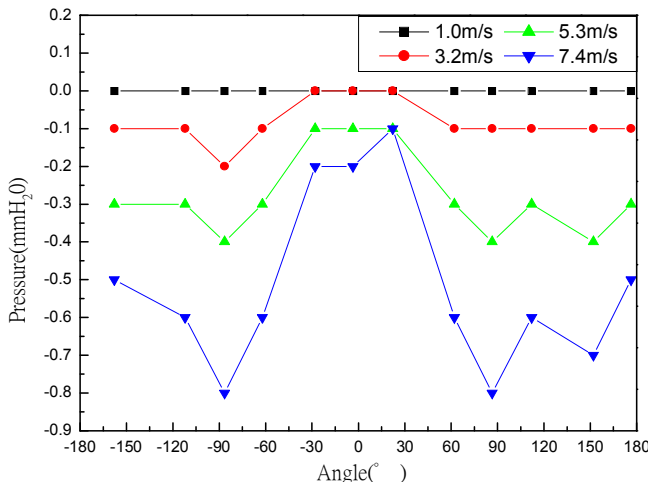
二、正立方體數據

在四個轉速下所測出的雷諾數值皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，比較圖(七)後可知，流場中亦應會有分離點及尾流的情況。

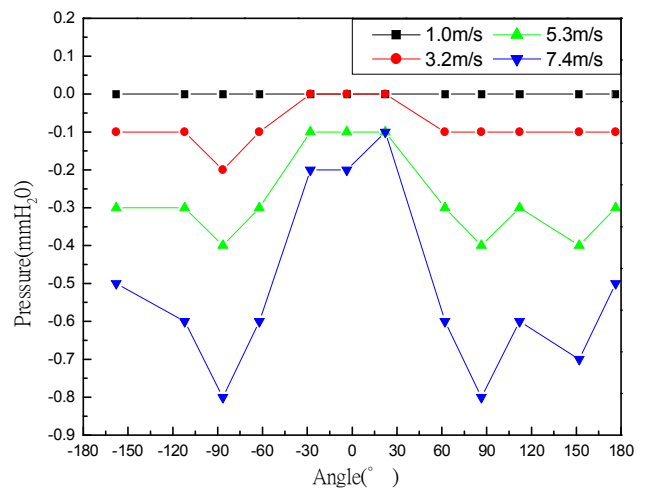
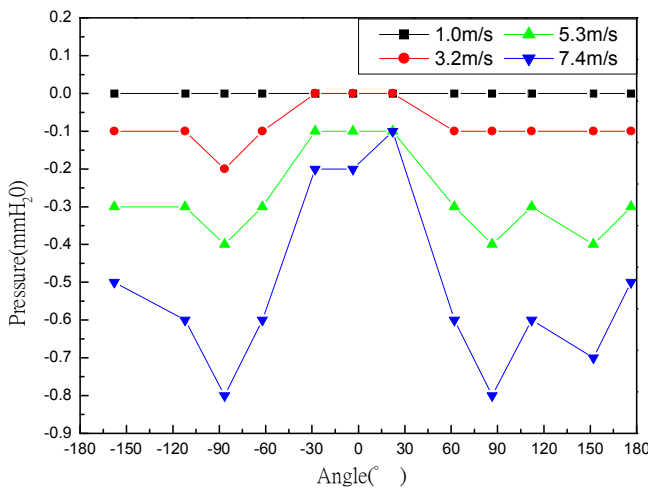
圖(十五)因為流速太低讀取不到壓力值。圖(十七)~圖(十八)可看出明顯的分離點(壓力最低處)位置約於 $\pm 60^\circ \sim \pm 90^\circ$ 間，也有分離點向風的來向移動的狀況出現。

圖(十七)~圖(十八)數據大約左右對稱，因為正立方體橫切面為一左右對稱形狀。圖(十六)左右未對稱，負角度區有分離點(且介於 $-60^\circ \sim -90^\circ$)，但是正角區無，這是因為皮托管壓力計可測量到的最小刻度為 0.1，正角區壓力讀數為 -0.1，與負角區分離點處的 -0.2 僅差 -0.1，所以推測可能為儀器造成的誤差。

在 5.3m/s、7.4m/s 時，可發現正面受風 A 面的第三、四層稍微有點不對稱，在觀察了白蠟油產生的煙線(圖十九)後發現，正立方體與金字塔有非常大的不同：正立方體在正面也會形成渦流，大約是在最底下的兩層，所以推測數據的不對稱是因為渦流造成的壓力值混亂。而在背風面處則與金字塔相同，一樣會有渦流出現，進而影響後方壓力分布的對稱性。



圖(三十六) 正立方體第一層(左)、第二層(右)於不同轉速下壓力比較圖



圖(三十七) 正立方體第三層(左)、第四層(右)於不同轉速下壓力比較圖

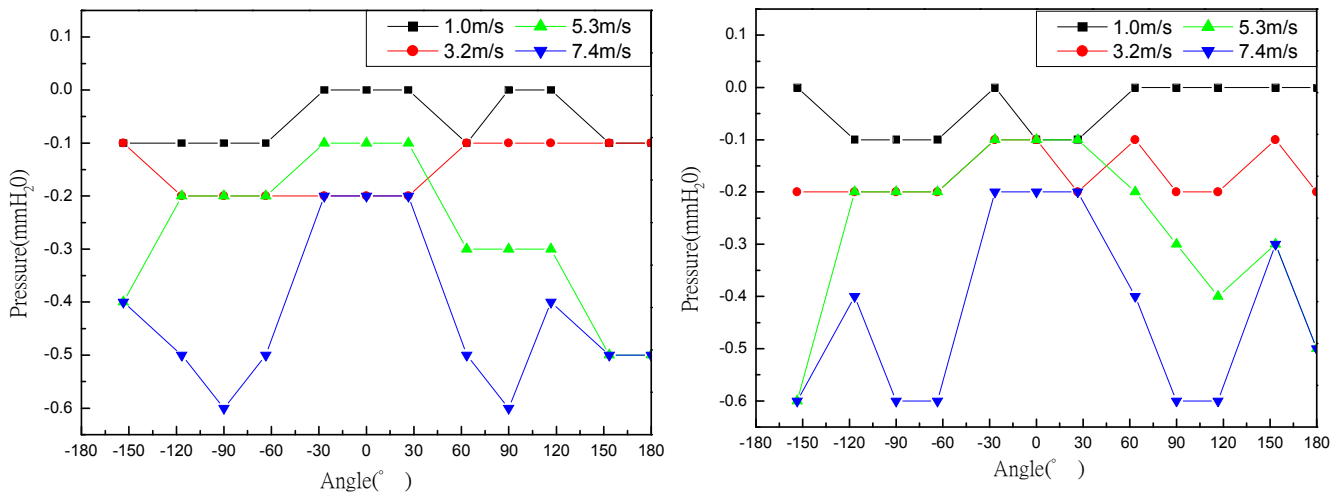
圖(三十六)、圖(三十七)為正立方體各層的比較圖，從四圖中皆可發現：5.3m/s、7.4m/s 的趨勢大致相同，但是 7.4m/s 的壓差大過 5.3m/s 的壓差。而 1.0m/s、3.2m/s 因為流速太小，所以流場並未很穩定，以致無法看到明顯的分離點位置，而且壓差也比較小。

三、模型 C 數據

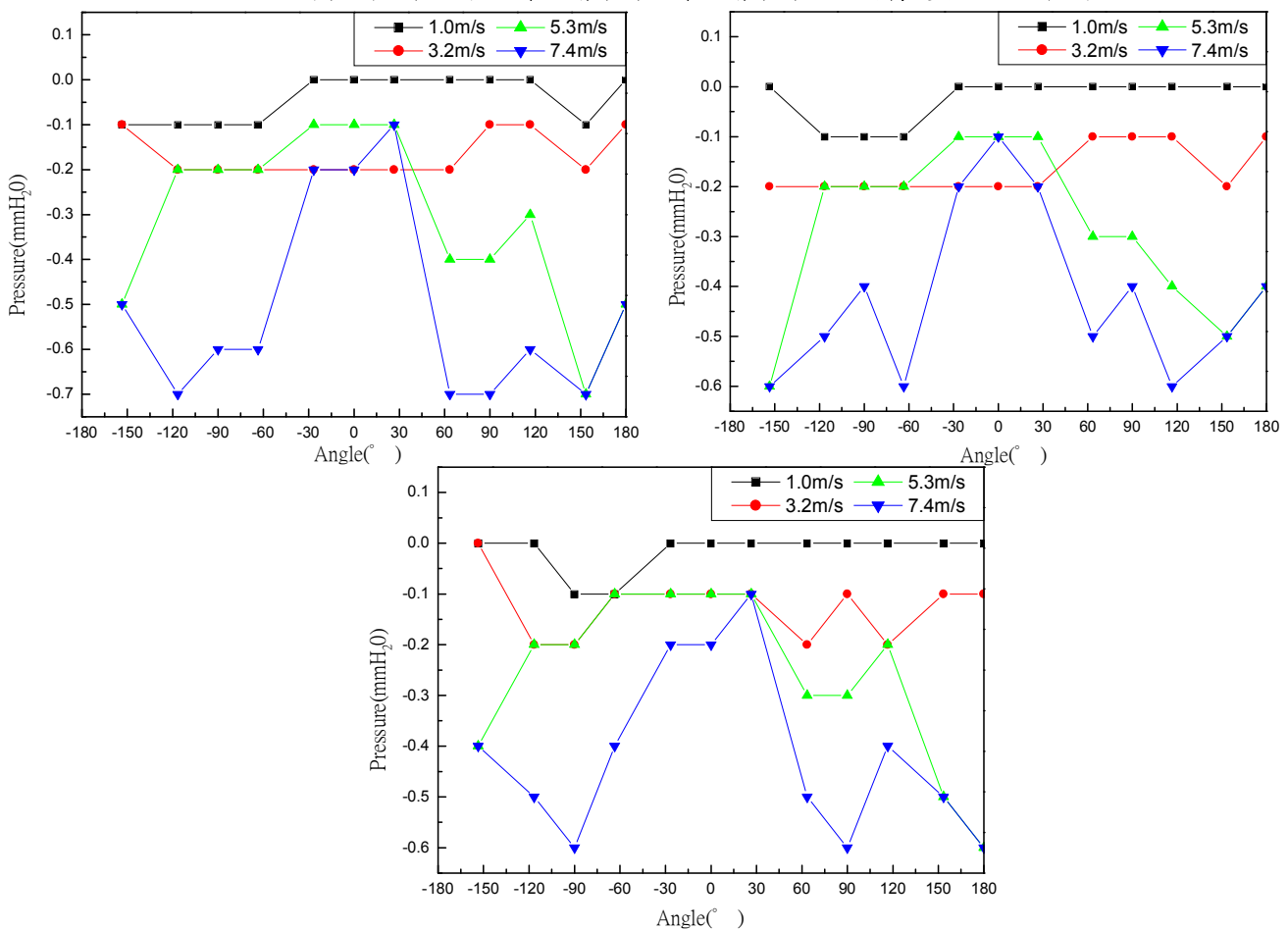
在四個轉速下所測出的雷諾數值皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，比較圖(七)後可知，流場中亦應會有分離點及渦流的情況。

圖(二十、二十一、二十二)因為流速太低，壓力趨勢並未很明顯。從圖(二十三)，我們能觀察到與正立方體相同的幾個部分：流場是對稱的，因為模型 C 的橫切面為對稱形；分離點有向風的來向移動的現象；D 面的壓力值不對稱，因為後方有尾流，且從圖(二十四)中可觀察到其背風面有渦流。而特別的是：我們仍能發現模型 C 的 A 面最下方約三層左右，壓力值出現較不對稱的情況，造成這個現象的原因，我們可以從圖(二十四)中觀察到，模型的最底下三層左右出現渦流。

圖(三十八)~圖(三十九)為模型 C 各層的比較圖，五圖比較仍可得到相同的結論：風速越高，壓差越大，但趨勢仍接近，且風速最高時壓力趨勢最明顯。



圖(三十八) 模型 C 第一層(左)、第二層(右)於不同轉速下壓力比較圖



圖(三十九) 模型 C 第三層(左上)、第四層(右上)、第五層(下)於不同轉速下壓力比較圖

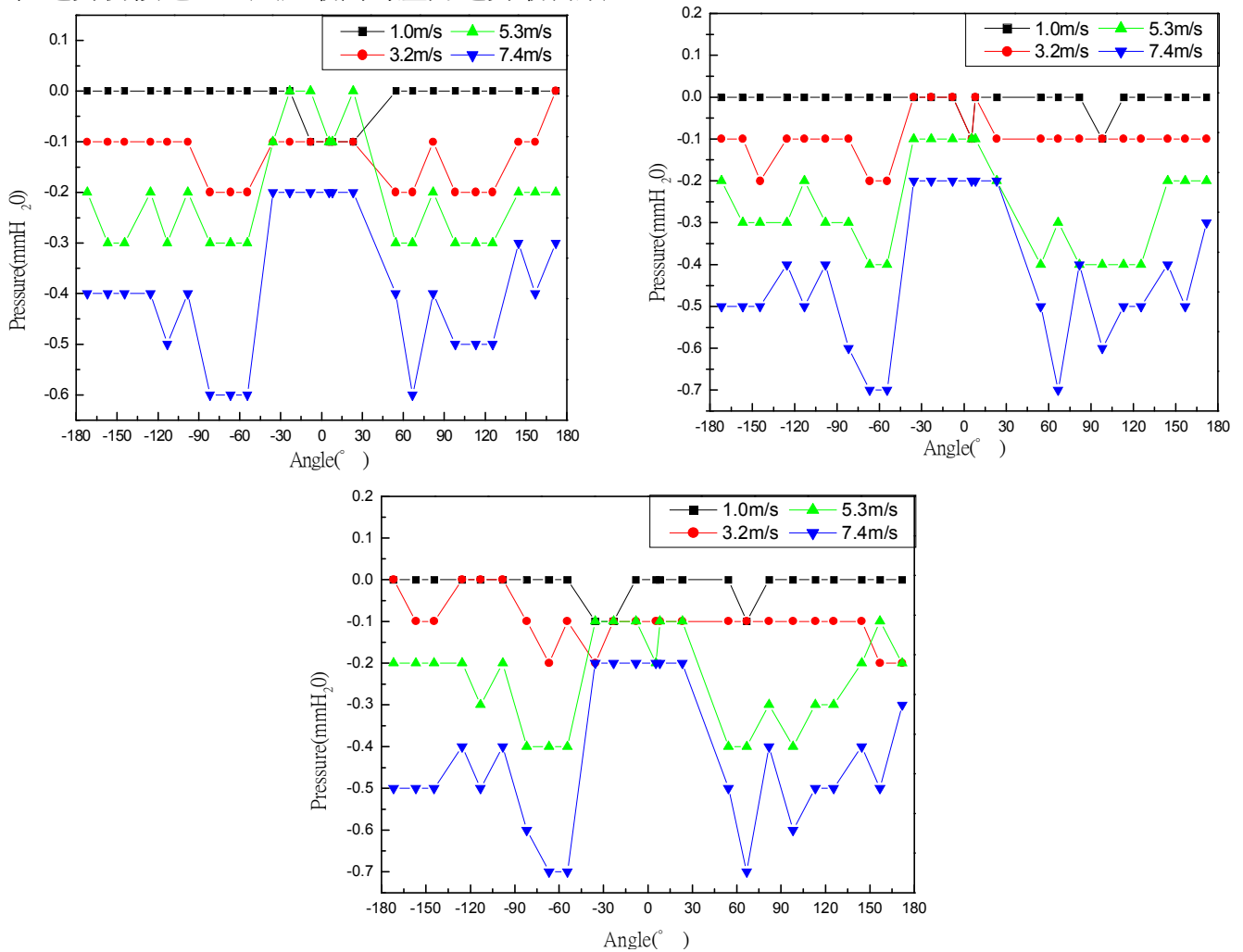
四、模型 D 數據

在四個轉速下所測出的雷諾數值皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，比較圖(七)後可知，流場中亦應會有分離點及渦流的情況。

圖(二十五、二十六)因為流速太低，壓力趨勢並未很明顯。從圖(二十七、二十八)，我們能觀察到與之前相同的幾個部分：流場是對稱的，因為模型 D 的橫切面為對稱形；分離點有向風的來向移動的現象；D 面的壓力值不對稱，因為後方有尾流，且從圖(二十九)中可觀察到其背風面有渦流。而特別的是：我們仍能發現模型 D 的 A 面最下方約一層左右，壓力值出現

較不對稱的情況，造成這個現象的原因，我們可以從圖(二十四)中觀察到，模型的最下層兩左右出現渦流。

圖(四十)為模型 D 各層的比較圖，三圖比較仍可得到相同的結論：風速越高，壓差越大，但趨勢仍接近，且風速最高時壓力趨勢最明顯。



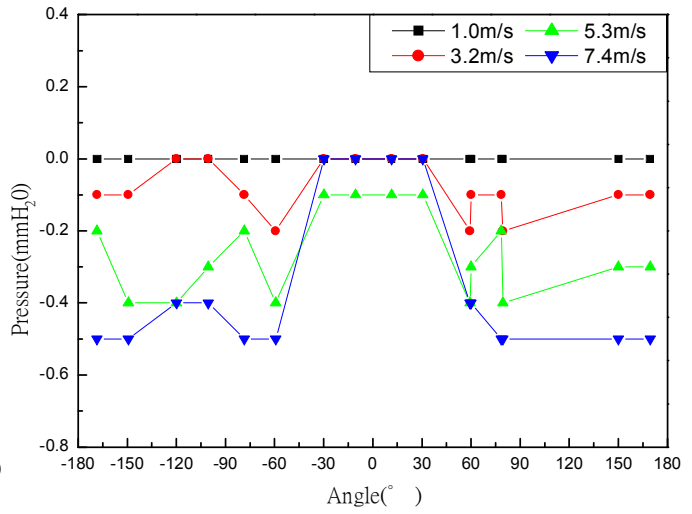
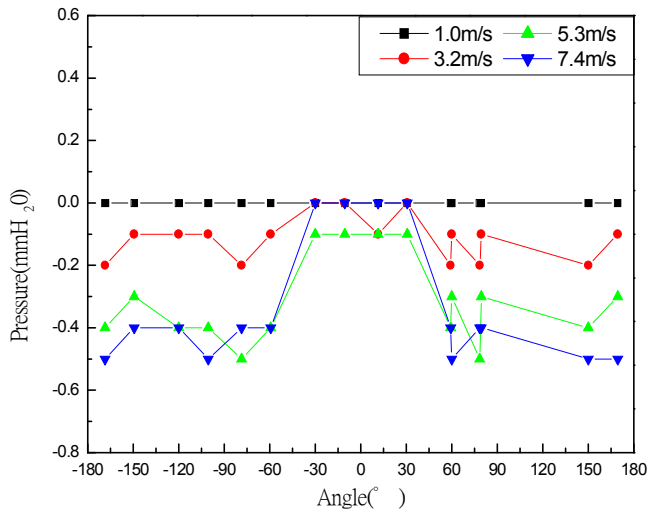
圖(四十) 模型 D 第一層(左上)、第二層(右上)、第三層(下)於不同轉速下壓力比較圖

五、模型 E 數據

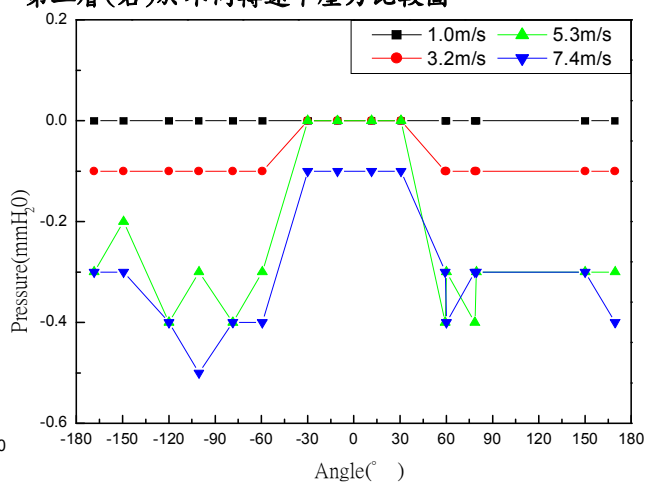
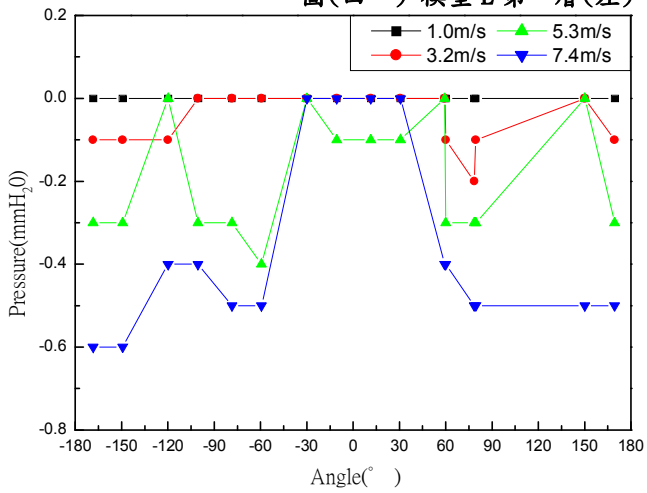
在四個轉速下所測出的雷諾數值皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，比較圖(七)後可知，流場中亦應會有分離點及渦流的情況。

圖(三十、三十一)因為流速太低，壓力趨勢並未很明顯。從圖(三十二、三十三)，我們能觀察到與之前相同的幾個部分：流場是對稱的，因為模型 E 的橫切面為對稱形；分離點有向風的來向移動的現象；D 面的壓力值較之前的正立方體、模型 C 及模型 D 更不對稱，因為後方有尾流，且從圖(三十四)中可觀察到其背風面有較之前三個模型更大的渦流。而特別的是：我們仍能從圖(三十四)中觀察到，模型的最下兩層左右出現渦流。

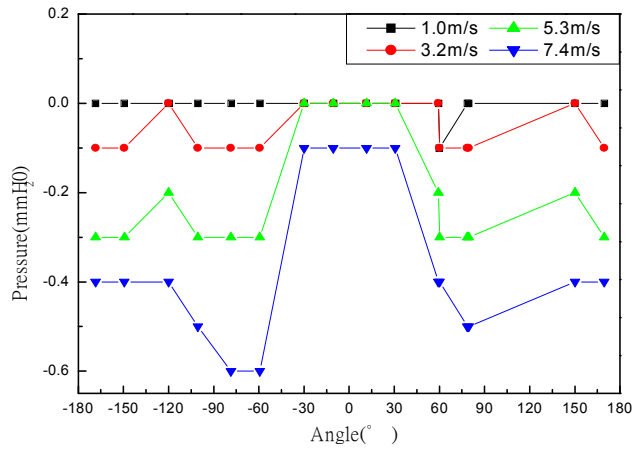
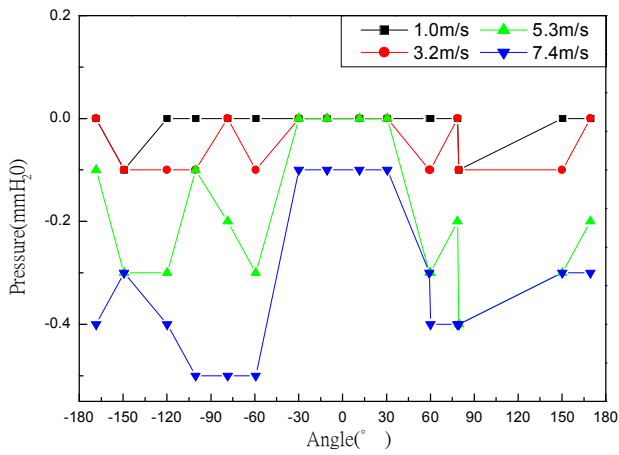
圖(四十一)~圖(四十三)為模型 E 各層的比較圖，六圖比較仍可得到相同的結論：風速越高，壓差越大，但趨勢仍接近，且風速最高時壓力趨勢最明顯。



圖(四一) 模型 E 第一層(左)、第二層(右)於不同轉速下壓力比較圖

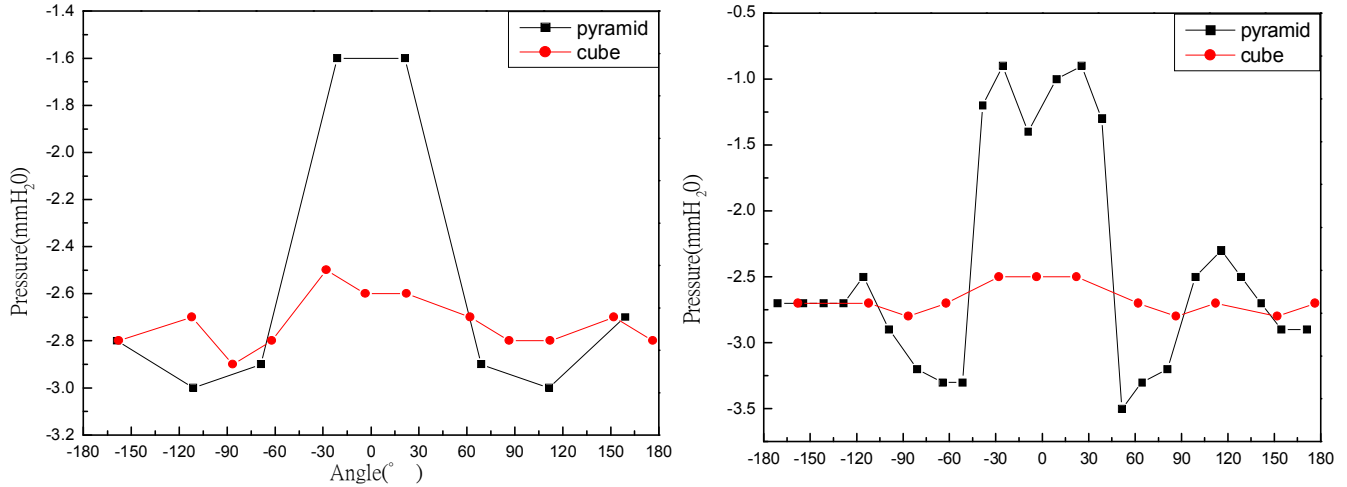


圖(四十二) 模型 E 第三層(左)、第四層(右)於不同轉速下壓力比較圖

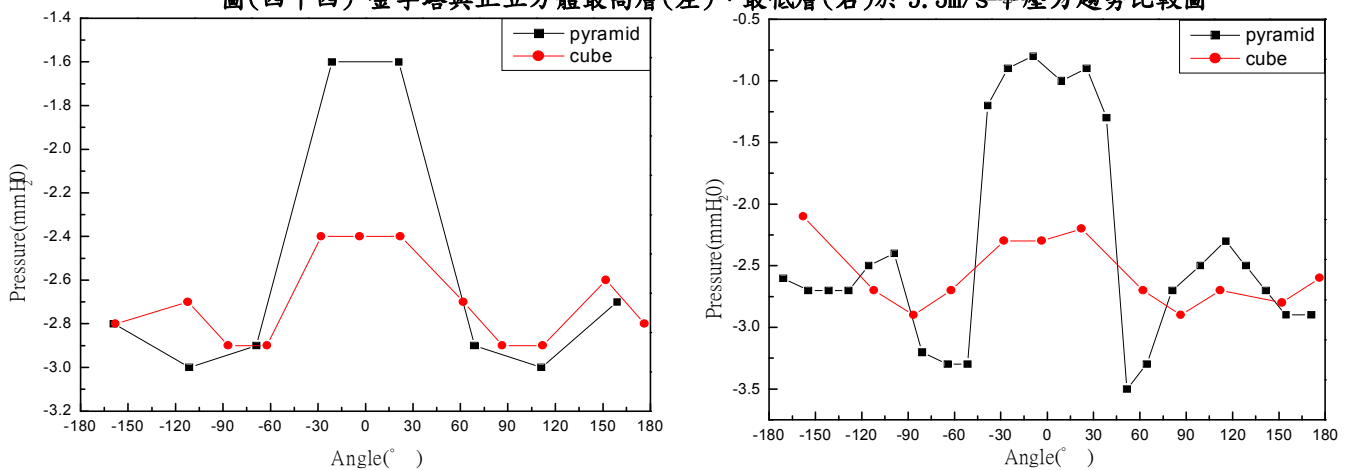


圖(四十三) 模型 E 第五層(左)、第六層(右)於不同轉速下壓力比較圖

六、金字塔與正立方體數據比較



圖(四十四) 金字塔與正立方體最高層(左)、最低層(右)於 5.3m/s 下壓力趨勢比較圖

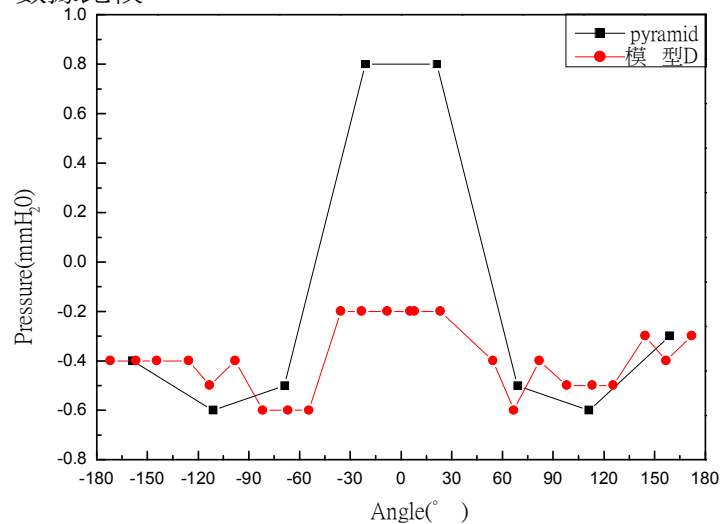


圖(四十五) 金字塔與正立方體最高層(左)、最低層(右)於 7.4m/s 下壓力趨勢比較圖

從圖(四十四)、圖(四十五)中可得知，金字塔與正立方體共同特徵是：分離點位置相近、數據對稱。但金字塔的壓差較正立方體大。

當流速越高時，金字塔與正立方體的壓力分佈密合度越高。

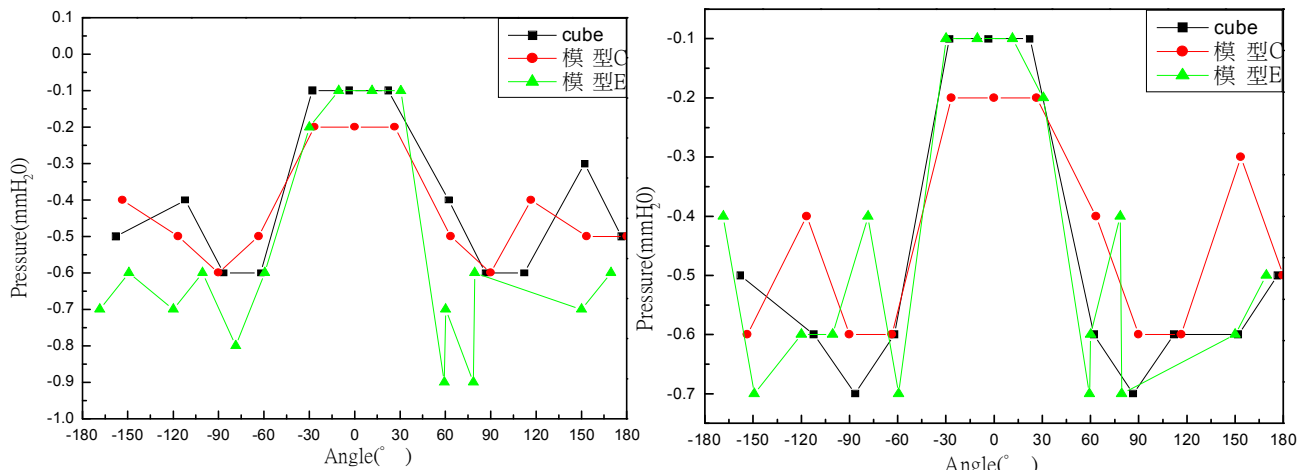
七、金字塔與模型 D 數據比較



圖(四十六) 金字塔與模型 D 最高層 7.4m/s 下壓力趨勢比較圖

從圖(四十六)中可得知，金字塔與模型 D 共同特徵是：分離點位置相近、數據對稱。但金字塔的壓差較模型 D 大。當流速最高時，可見到壓力分布密合度最高的情況。

八、正立方體與模型 C、E 數據比較



圖(四十七) 正立方體與模型 C、E 最高層(左)、第二層(右)7.4m/s 下壓力趨勢比較圖

從圖(四十七)中可得知，正立方體與模型 C、E 共同特徵是：分離點位置相近、數據對稱。但正立方體與模型 E 大於模型 C。當流速最高時，可見到壓力分布密合度最高的情況。

捌、結論

實驗中所使用的四種風速(為 1.0m/s、3.2m/s、5.3m/s、7.4m/s)的雷諾數皆介於 $10^3 \sim 2 \times 10^5$ ，依照資料，此時應有分離點出現，且分離點會向風的來向移動，而實驗結果也符合，可以從數據看到，在數據中的最低壓便是分離點。數據中也可以發現金字塔、正立方體及長方體皆會有對稱的情況出現，因為其橫切面皆為對稱形。

依據煙設拍攝：金字塔、正立方體及長方體在背風面皆有渦流產生(當高度越大時渦流越大)，但是僅有正立方體與長方體的正面下方有渦流。

因為金字塔、正立方體及長方體的數據皆有對稱性，但是從煙線觀察到長方體後方渦流較大，故暫時推測長方體為較不適當的建築物形狀，而正立方體與金字塔則較適合用以作為建築物形狀。

另外藉由疊圖比較同形狀模型的同一層在不同流速下的表現，發現：當流速越來越大時，各層的壓差雖然會越來越大，但是壓力分布的趨勢仍然接近。

若藉由疊圖比較不同形狀模型的同一層在不同流速下的表現，會發現：當流速越大時，模型間的壓力分布密合度越高。

在往後的實驗中，實驗模型部分還會加入各種不同的建築，如：連棟建築、 Γ 字型建築、 \square 字型的建築……，增加研究模型的多樣性。

另外，實驗將加入二維皂泡膜流場顯影，以不同角度來驗證實驗，因為煙線只可從側面看流場，若用二維皂泡膜流場顯影，將可用俯視的方式觀察分離點的位置及流場的分佈，能

更確切觀察模型周圍流場的分布。

玖、參考資料及其他

- 一、方中 (民 89)。簡明流體力學 (初版)。臺北市：五南。
- 二、朱佳仁 (民 90)。工程流體力學 (初版)。臺北縣：成陽出版。
- 三、陶巧妤(民 96)。金字塔附近的流體力學效應。台北市立中山女子高級中學專題研究，未出版，台北市。
- 四、林巧曦、游舒淳、呂雨蓉、陳盈如 (民 94)。大自然的飛行家—蝴蝶飛行之初步探討[實驗設備製作-風洞製作]。中華民國第四十五屆中小學科學展覽會物理科研究報告，未出版。民 96 年 11 月 20 日，取自「中華民國第四十五屆中小學科學展覽會參展作品專輯」：<http://www.hlvs.ylc.edu.tw/science/senior/0408/040812.pdf>

【評語】 040113

本作品討論不同模型在風洞中流場分佈的狀況，詳細精準的量測模型各部位壓力的變化量，並利用攝影觀測渦流的形成，整體實驗的設計及執行都有很好的創意及表現。