

第 12 屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA12-174

作品名稱：漩渦對橋墩侵蝕與堆積現象之探討

姓名：游馥瑀

關鍵字：橋墩、漩渦、自由渦流

目錄

壹、研究動機與目的.....	3
1-1 研究動機	3
1-2 研究目的	3
貳、研究設計與方法.....	4
2-1 研究架構	4
2-2 研究工具	5
2-3 實驗器材	5
2-4 研究方法	6
2-4-1 固定轉速產生漩渦，並探討其基本性質	6
2-4-2 探討質點移動路徑隨轉速改變之變化情形.....	6
2-4-3 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經所產生漩渦與紊流之現象.....	7
2-4-4 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經後沙子侵蝕與堆積之情形.....	7
2-4-5 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經後波紋與流場之變化.....	7
參、實驗資料分析與結果討論.....	8
3-1 【實驗一】 固定轉速產生漩渦，並探討其基本性質	8
3-1-1 【實驗一】 資料分析	8
3-1-2 【實驗一】 結果討論.....	11
3-2 【實驗二】 探討質點移動軌跡隨轉速改變之變化情形	12
3-2-1 【實驗二】 資料分析	12
3-2-2 【實驗二】 結果討論.....	15
3-3 【實驗三】 以不同的障礙物模擬橋墩，探討其漩渦及紊流之現象	15
3-3-1 【實驗三】 資料分析如圖 3-3-1~3-3-8	15
3-3-2 【實驗三】 結果討論.....	16
3-4 【實驗四】 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流過後沙子侵蝕與堆積之情形.....	17
3-4-1 【實驗四】 資料分析	17
3-4-2 【實驗四】 結果討論.....	23
3-5 【實驗五】 以不同形狀的障礙物模擬橋墩，探討水流流過後的波紋與流場之變化.....	25
3-6 綜合討論	27
肆、結論.....	28
伍、未來展望.....	28
參考文獻.....	29

摘要

本研究旨在探討漩渦的基本性質，利用磁石攪拌器於容器中製造模擬自由渦流，以 Tracker 軌跡分析軟體追蹤質點並分析其位移、路徑、速度……等等，並藉由自行設計的河道橋墩模擬，量測實驗結果並以 Motic images plus2.0 軟體加以分析數據，本研究結論如下：

第一部分，包含實驗一、二，主要以轉速、質點質量為操作變因，利用磁石攪拌器於容器中製造及模擬自由渦流，發現質點質量太小會發生旋出現象，質點質量較大則愈易被漩渦旋入；磁石攪拌器轉速過小（360rpm 以下），質點會因漩渦向心力不足而旋出，而轉速 550rpm 以上所形成之自由渦流，仍能提供足夠向心力，使質點旋入。

第二部分，包含實驗三、四、五，以障礙物形狀為操作變因，藉由自行設計的河道橋墩模擬，探討其漩渦及紊流現象，與水流流過障礙物的波紋及流場變化。發現水流對障礙物迎水面進行直接沖刷，後受阻分流，並於障礙物近出水口兩側形成紊流及漩渦，造成底面角後方發生大量侵蝕，同時沙子被搬運且堆積在障礙物背水側，故此處侵蝕量明顯較少。

又根據橋墩沖刷理論，觀察投影在紙屏上的波紋及流場變化，發現當均勻水流流經橋墩時，因受橋墩阻礙，周圍流場於是產生變化，而其中向下射流及馬蹄型渦流為影響橋墩局部沖刷深度的主要原因；尾跡渦流則造成背水側侵蝕情形較不嚴重，甚至有堆積現象的產生。

壹、研究動機與目的

1-1 研究動機

在一次班遊去爬跑馬古道的過程途中，大夥兒早已汗流浹背，當猴峒溪溪水映入眼簾之際，大家便捲起褲管，一股腦兒的往溪裡跑，完全沒有安全上的顧慮，然而此時一個想法於焉成形：此種流速不慢的溪流，是否有任何紊流或漩渦會造成生命危險，於是我們便著手進行紊流及漩渦現象的實驗與討論。除了欲看出何地會產生漩渦，亦好奇漩渦與沙子之間的變化情形究竟為何？另外，每次經過河流上的橋梁，看見下方裸露的巨大橋墩，總是好奇究竟水流變化是如何造成橋墩的裸露現象，此亦引發了我們對橋墩形狀與河流沉積物侵蝕堆積之關聯性的探討。

1-2 研究目的

- 一、固定轉速產生漩渦，並探討其基本性質
- 二、探討質點移動路徑隨轉速改變之變化情形
- 三、以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經所產生紊流與漩渦之現象
- 四、以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經後沙子侵蝕與堆積之情形
- 五、以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經後波紋與流場之變化

1-3 名詞解釋

一、漩渦(vortex)

是指每個流體元素不斷繞著旋轉中心旋轉，而流體形成漩渦的兩個條件，一為垂直向下的速度，二為切線旋轉的速度。

二、自由渦流(Free vortex)

是指流體由中心的轉軸帶動液面旋轉，產生漩渦，因為速度與半徑成反比關係，所以半徑越小，轉速也越快，即本實驗一、二之漩渦形成原理。

三、強迫渦流(Forced vortex)

是指藉由圓柱形容器旋轉，而由外部力量帶動內部原本靜止的液體旋轉，其旋轉半徑與轉速成正比，所以半徑越大，轉速越快。

四、層流(Laminar flow)

流體的流動主要受到流體質點間相對動量的大小，和流體本身因黏滯性而產生的黏滯力所影響。當流體的速度很小，流體質點的動量也很小，而流體黏滯性造成的黏滯力會使流體做層狀的相對運動，稱做層流流動。

五、紊流(turbulent flow)

同上，當流體的速度增加，流體質點的動量也隨之增加，如果流體質點的動量比黏滯力大很多時，流體會無法保持層狀的運動，而開始出現不規則的漫散混合運動，稱為紊流流動，此漫散運動進而使流體產生迴旋之區域，即本實驗三、四中仿河道模型所產生的漩渦原理。

六、白努力定理(Bernoulli's Equation)

白努利從牛頓運動學中，利用能量守恆觀念：動能+位能=定值，推導出白努利定律：動能+壓力=定值。其公式為 $P_1 + dgh_1 + \frac{1}{2}dV_1^2 = P_2 + dgh_2 + \frac{1}{2}dV_2^2$

(P ：壓力， d ：流體密度， V ：流速， h ：高度)

簡單來說，即當液體流速減少時，壓力便會增加。

七、旋度 (Curl)

旋度為一向量算子，可表示三維向量場對某一點附近所造成的旋轉程度。旋度向量的方向表示向量場在此點附近旋轉度最大環量的旋轉軸，它和向量旋轉的方向滿足右手定則；其大小則是繞著這個旋轉軸旋轉的最大環量。若令向量 v 代表流速場，其旋度存在時，則代表該流場有漩渦產生。又根據旋度公式：

$$\frac{f + \varepsilon}{h} = \text{constant}$$

f ：科氏力($f = 2\Omega \sin\Phi$)

ε ：向量子(若在北半球，其順時針為正，逆時針為負)

h ：深(厚)度

貳、研究設計與方法

2-1 研究架構

本研究依據研究目的，自行設計實驗方法，將研究架構以圖 2-1-1 表示。

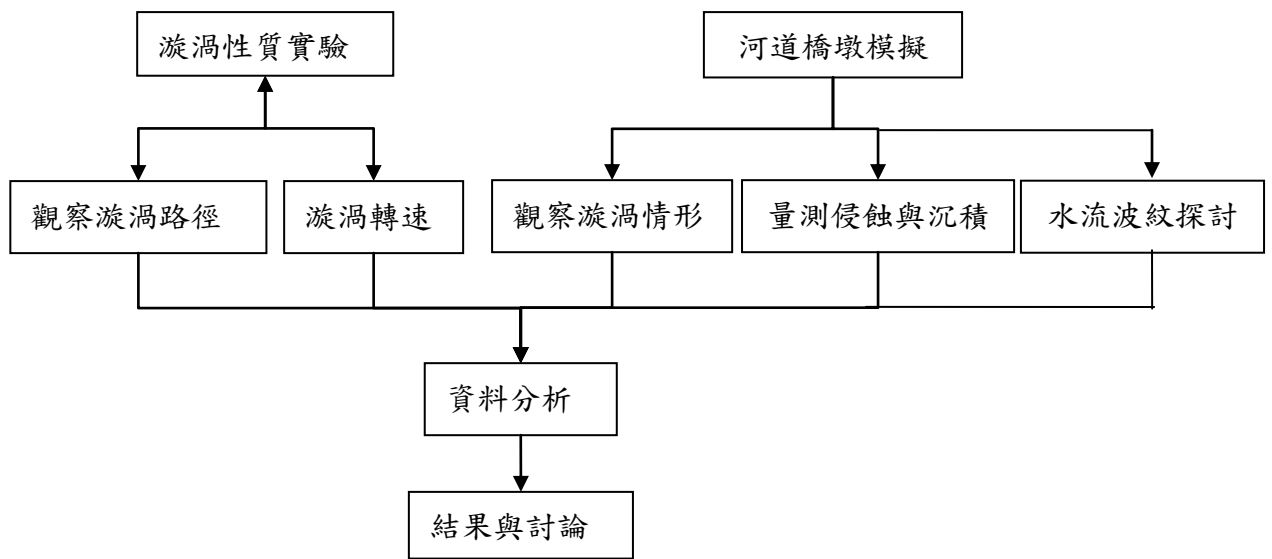


圖 2-1-1 本研究架構圖

2-2 研究工具

研究目的一及研究目的二利用高速攝影機將漩渦中的保麗龍球運動路徑錄影後，經由 Tracker 軌跡分析軟體，進行資料分析；研究目的三利用高速攝影機連續拍攝水流流經障礙物情形，進行觀察討論；研究目的四利用高速攝影機拍攝障礙物每一柱面，攝得之照片則經由 Motic images plus2.0 軟體進行侵蝕與堆積分析。

2-3 實驗器材

器材名稱	數量
1.保麗龍球	2 個
2.五公升大燒杯	1 個
3.八公分長的磁石	1 條
4.磁石攪拌器	1 台
5.高速攝影機	1 台
6.長方形透明壓克力箱 (如圖 2-3-1)	1 組
7.木製蓄水箱(內設有一 水匣門，如圖 2-3-2)	1 組
8.篩網	1 張
9.沙子	數公斤
10.木板架(中間挖孔)	1 個
11.染劑	1 罐

12.壓克力容器障礙物 (底面積皆為 64 平方公分，如圖 2-3-3	8 個
--	-----



圖 2-3-1 壓克力仿河道模型



圖 2-3-2 木製蓄水箱



圖 2-3-3 已裝沙子的障礙物擬橋墩模型

2-4 研究方法

2-4-1 固定轉速產生漩渦，並探討其基本性質

實驗一之裝置如圖 2-4-1 所示，實驗步驟如下：

- (一)將裝滿四公升水的燒杯置於磁石攪拌器上方，再放入磁石
- (二)啟動磁石攪拌器的電源，使其轉速達 1150rpm
- (三)待漩渦出現後，分別放入藍色（質量約 0.058 克）及黑色保麗龍球（質量約 0.372 克）作為觀察漩渦水流之質點
- (四)利用置於中間挖孔之木板上的高速攝影機，記錄質點運動軌跡
- (五)利用 tracker 軌跡分析軟體將拍攝影片的結果量化及分析數據資料

2-4-2 探討質點移動路徑隨轉速改變之變化情形

實驗二之裝置如圖 2-4-1 所示，實驗步驟如下：

- (一) 將裝滿四公升水的燒杯置於磁石攪拌器上方，再放入磁石
- (二)啟動電源，固定磁石攪拌器之角速度
- (三)待漩渦出現後，放入黑色保麗龍球（質量約 0.372 克），作為觀察漩渦水流之質點

- (四)利用置於中間挖孔之木板上的高速攝影機，記錄質點運動軌跡
- (五)利用 tracker 軌跡分析軟體將拍攝影片的結果量化及分析數據資料

2-4-3 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經所產生漩渦與紊流之現象

實驗三之裝置如圖 2-4-2 所示，實驗步驟如下：

- (一)於壓克力箱中置入 2.5 公分高的沙子，並於距出水口 80 公分處放入不同形狀之障礙物
- (二)將高速攝影機
- (三)利用三條水管放 3 公升水於木製水匣門，並滴加染劑
- (四)打開水匣門約 0.3 公分，讓水順勢流經障礙物
- (五)利用置於中間挖孔之木板上的高速攝影機拍攝水流流況

2-4-4 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經後沙子侵蝕與堆積之情形

實驗四之裝置如圖 2-4-2 所示，實驗步驟如下：

- (一)於壓克力箱中置入 2.5 公分高的沙子，並於距出水口 80 公分處放入以標記沙子刻度之障礙物
- (二)利用三條水管放 7 公升水於木製水箱
- (三)打開水匣門約 0.3 公分，讓水順勢流經障礙物
- (四)記錄水流經障礙物後沙高的改變，並利用 Motic Images Plus2.0 軟體分析沙子堆積與侵蝕之現象
- (五)於壓克力箱中置入 3.5 公分高的沙子，重複步驟(一)~(四)

2-4-5 以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流經後波紋與流場之變化

實驗五之裝置如圖 2-4-3 所示，實驗步驟如下：

- (一)於壓克力箱中距出水口 80 公分處放置障礙物
- (二)模擬水波槽的實驗裝置，於壓克力箱的上方放置強光源、下方放置白紙
- (三)固定水管使水順勢流經障礙物，並利用高速攝影機連續拍攝水流在白紙上的投影成像



圖 2-4-1 實驗一、二裝置圖



圖 2-4-2 實驗三、四裝置圖



圖 2-4-3 實驗五裝置圖

參、實驗資料分析與結果討論

3-1 【實驗一】固定轉速產生漩渦，並探討其基本性質

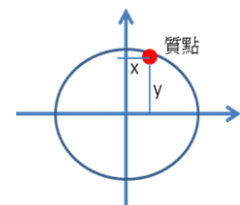
3-1-1 【實驗一】資料分析

我們利用磁石攪拌器於裝四公升水（約 17.3 公分高）的燒杯中製造出直徑為 18 公分的漩渦，初以藍色保麗龍球作為質點，並利用高速攝影機將其移動路徑錄影後，經由 Tracker 軌跡分析軟體進行分析，又因保麗龍球旋入路徑呈圓形漸小，故分析時以漩渦中心為原點，僅擇 X 方向作為代表說明，四次 x 方向位移變化分別如圖 3-1-1~圖 3-1-4。後再利用已增加質量之黑色保麗龍球作為質點，重複上述步驟，並測得其路徑、動能、速率及角速度變化如圖 3-1-5~圖 3-1-10，說明如下：

座標軸符號解釋：

X：藍色保麗龍球質點相對漩渦中心（原點）的 x 方向位移

T：時間變化



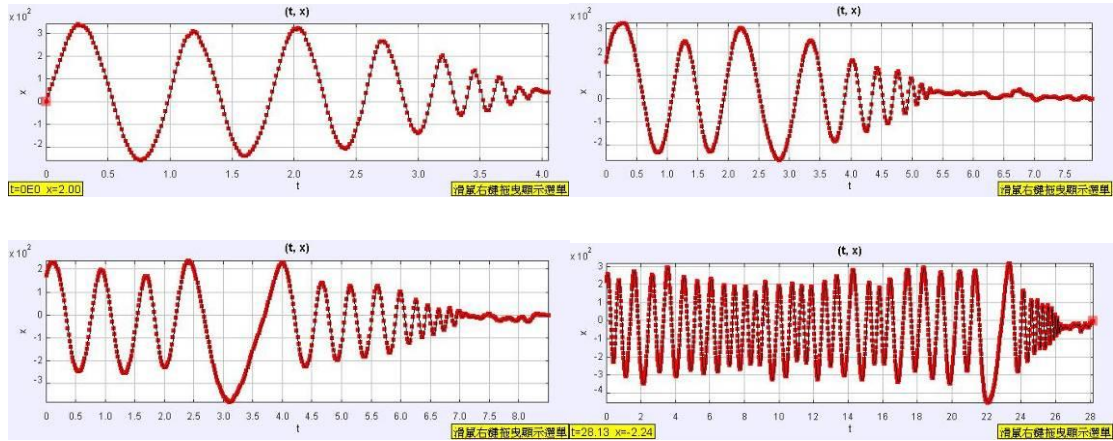


圖 3-1-1 藍色保麗龍球在 4 秒時旋入中心的 x 方向位移圖(左上圖)

圖 3-1-2 藍色保麗龍球在 5.3 秒時旋入中心的 x 方向位移圖(右上圖)

圖 3-1-3 藍色保麗龍球在 7 秒時旋入中心的 x 方向位移圖(左下圖)

圖 3-1-4 藍色保麗龍球在 26.5 秒時旋入中心的 x 方向位移圖(右下圖)

座標軸符號解釋：

X：黑色保麗龍球質點相對漩渦中心（原點）的 x 方向位移

Y：黑色保麗龍球質點相對漩渦中心（原點）的 y 方向位移

V：黑色保麗龍球質點的速率

K：黑色保麗龍球質點的動能

W：黑色保麗龍球質點的角速度

T：時間變化

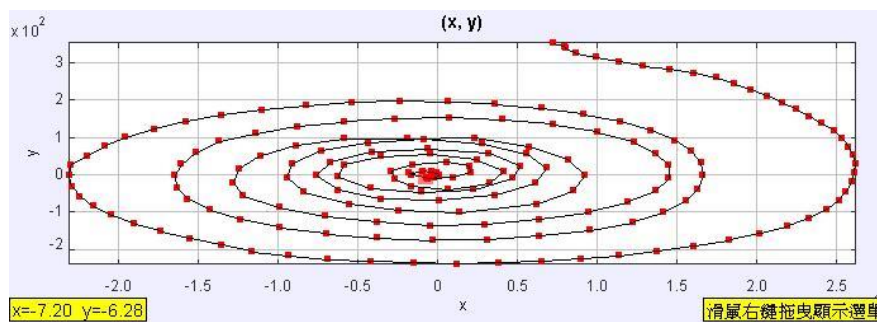


圖 3-1-5 黑色保麗龍球相對漩渦中心（原點）的 x-y 方向移動路徑

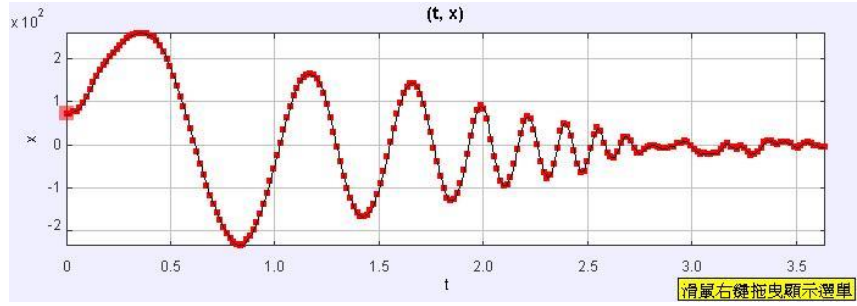


圖 3-1-6 黑色保麗龍球相對漩渦中心（原點）的 X 方向位移變化

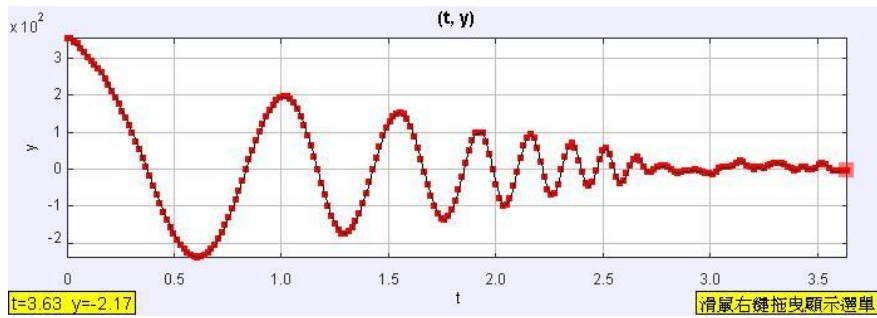


圖 3-1-7 黑色保麗龍球相對漩渦中心（原點）的 Y 方向位移變化



圖 3-1-8 黑色保麗龍球旋入過程的速率變化



圖 3-1-9 黑色保麗龍球旋入過程的動能變化

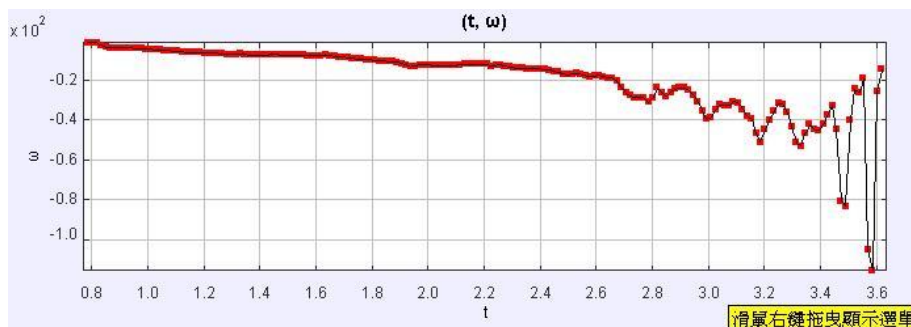


圖 3-1-10 黑色保麗龍球旋入過程的角速度變化

3-1-2 【實驗一】結果討論

實驗結果發現，藍色保麗龍球被漩渦旋入之路徑並非直接旋入，而是在被旋入前先大幅度的旋出，在外圍不斷繞圈至最後才慢慢被吸入中心處，並於漩渦中心做旋轉運動；由圖 3-1-2~圖 3-1-4 可觀察到振幅衰減變化，顯示藍色保麗龍球在旋入漩渦中心前，呈現一簡諧運動，而其作圓周運動的半徑隨時間漸漸減小，直至旋入漩渦中心。然而在圖 3-1-1 此種旋出現象卻不明顯，令我們倍感疑惑，對於此藍色保麗龍球不穩定的運動路徑，便推論可能為其質量過小的緣故，於是我們決定改變實驗器材，增加保麗龍球之質量，再進行一次實驗。

透過分析已增加質量之黑色保麗龍球質點，進行實驗討論，說明如下：

(一) 由圖 3-1-6 及圖 3-1-7，顯示出保麗龍球在 X、Y 方向的移動路徑隨時間變化而愈來愈接近漩渦中心，呈現一逐漸衰弱的簡諧運動，其衰弱的原因為保麗龍球做圓周運動的半徑隨時間不斷減小的緣故。而最後保麗龍球於 2.8 秒旋入漩渦中心。

實驗結果亦發現，黑色保麗龍球會直接旋入漩渦中心，並無像藍色保麗龍球發生旋出之現象，由圖 3-1-5~圖 3-1-7 均可以得證，因此我們推論，應是黑色保麗龍球質量較大的緣故，並由阿基米德浮力原理： $B=W=V \cdot D$ (B 為浮力，W 為質量，V 為排出的液體體積，D 為液體密度) 得出因黑色保麗龍質量較大，其浮力也大，因此其於水下的體積亦較大，較易被漩渦水流影響而順勢向內旋入。

(二) 本實驗當保麗龍球達漩渦中心後，因質點相較於漩渦中心而言較大，數據觀察上起伏太大，因此我們僅討論 2.8 秒以前質點旋入過程中的運動數據變化。由圖 3-1-8 及圖 3-1-9 可看出在 2.8 秒前，速率及動能均隨時間漸增，並在 2.8 秒時明顯達最大；另由圖 3-1-10 顯示保麗龍球在旋入漩渦中心前的角速度亦隨時間緩慢增加。

(三) 由以上實驗數據顯示漩渦中心的速率最大，外圍的速率較小，與自由渦流理論相符，因此可知我們在實驗一中所製造的漩渦為自由渦流。我們推論是因為磁石位於燒杯中央，能量是由磁石傳遞給水流並帶動水流旋轉，而這些能量再進而傳遞給更外圍的水流，故研判能量於傳遞的過程中逐漸散失，造成

中央速率最快而周圍速率漸小的現象。強迫渦流因為是由外部帶動內部旋轉，形成一拋物線，如圖 3-1-11 所示，漩渦外圍水流的高度差所造成的壓力差，可提供一向心力，使得質點能夠順利的旋入漩渦中心，此運動現象由牛頓第二運動定律 $F=ma$ 可換算得下式：

$$\rho g \Delta h A = \rho (A \Delta X) \frac{v^2}{R}$$

ρ : 液體密度
 A : 底面積
 Δh : 液體高度差
 Δx : 長度
 v : 速率
 R : 漩轉半徑

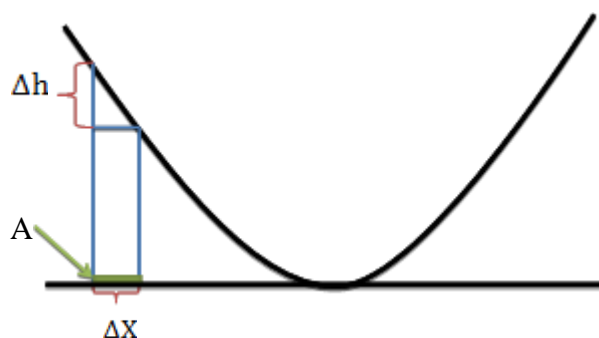


圖 3-1-11 強迫渦流示意圖

由於實驗一所製造出的漩渦為自由渦流，如圖 3-1-12 及圖 3-1-13 顯示自由渦流的側視及俯視圖，可知相較於強迫渦流相同 Δx 長度而言，自由渦流外圍的高度差 Δh 極小，且公式中 ρ 、 g 、 A 皆為定值，知自由渦流所受到的向心力與 Δh 成正比、與 R 成反比，所以自由渦流外圍的速率 v 值相較於渦流內圍的速率 v 值為小，可解釋本實驗圖 3-1-8~3-1-9 之速率及動能變化。



圖 3-1-12 自由渦流側視圖



圖 3-1-13 自由渦流俯視圖

(四)由圓周運動公式 $v=R\omega$ ，且自由渦流因外圍的速率 v 值相較於渦流內圍的速率 v 值為小，因此保麗龍球在旋入過程中的角速度隨時間緩慢增加，並在到達漩渦中心時最高。

3-2 【實驗二】探討質點移動軌跡隨轉速改變之變化情形

3-2-1 【實驗二】資料分析

藉由改變磁石攪拌器的轉速，利用高速攝影機將漩渦中的黑色保麗龍球運動路徑錄影後，經由 Tracker 軌跡分析軟體，進行資料分析後，路徑變化如圖 3-2-1~圖 3-2-8，說明如下：

X：黑色保麗龍球相對漩渦中心（原點）的 x 方向位移

Y：黑色保麗龍球相對漩渦中心（原點）的 y 方向位移

T：時間變化

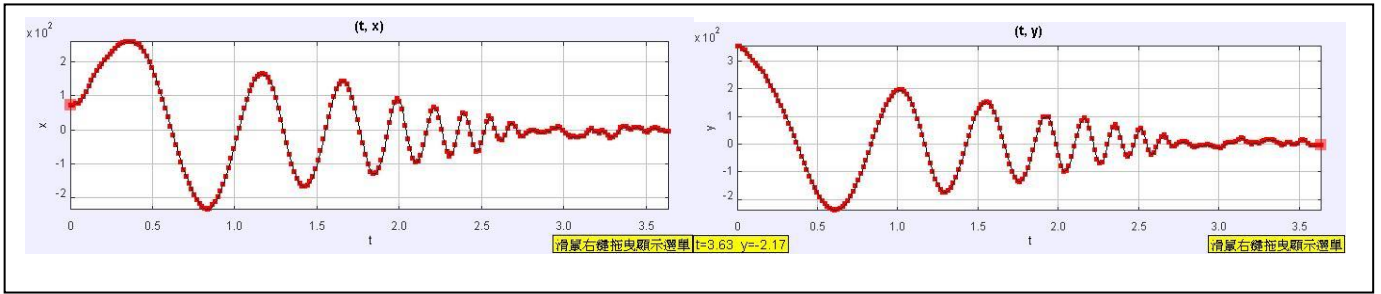


圖 3-2-1 黑色保麗龍球在轉速為 1150rpm 的 X 及 Y 位移變化圖

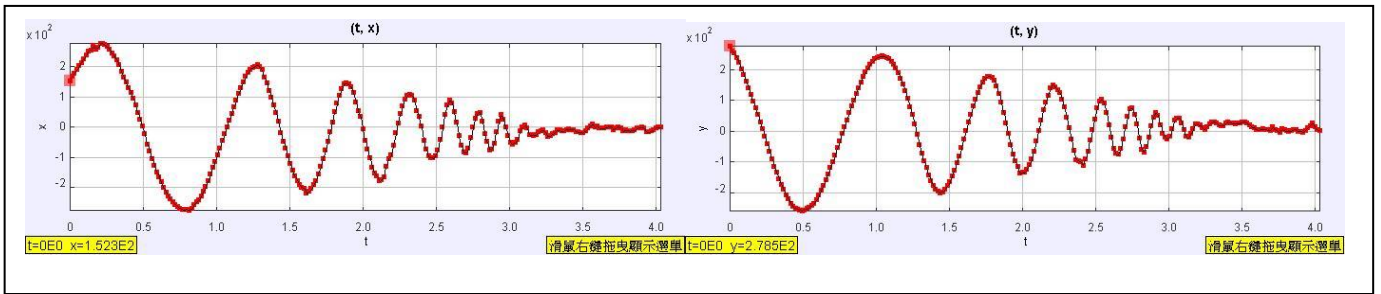


圖 3-2-2 黑色保麗龍球在轉速為 750rpm 的 X 及 Y 位移變化圖

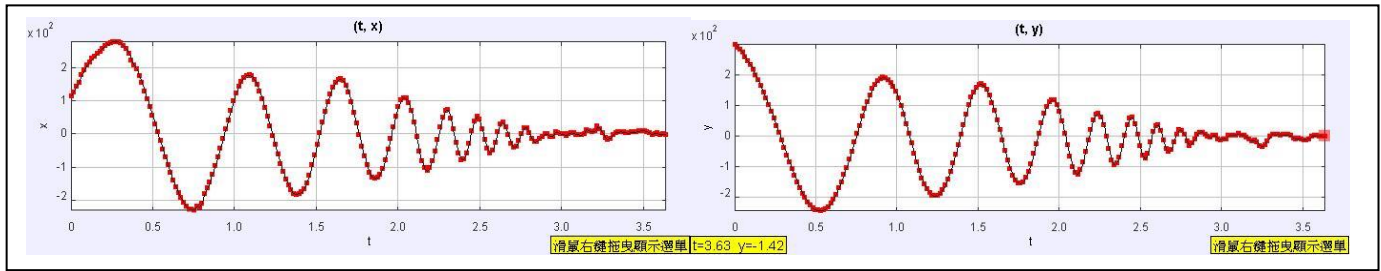


圖 3-2-3 黑色保麗龍球在轉速為 550rpm 的 X 及 Y 位移變化圖

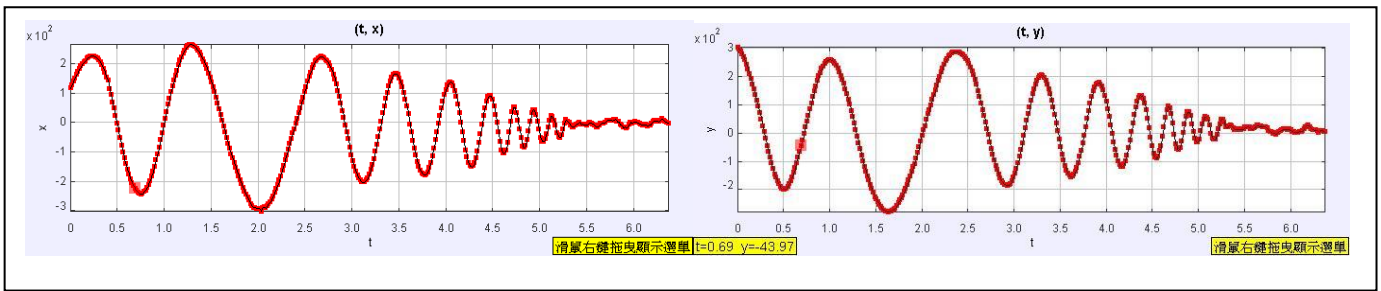


圖 3-2-4 黑色保麗龍球在轉速為 360rpm 的 X 及 Y 位移變化圖

以下為將黑色保麗龍球運動路徑經由 Tracker 軌跡分析軟體，進行資料分析後的實際路徑圖，如圖 3-2-5~圖 3-2-8。

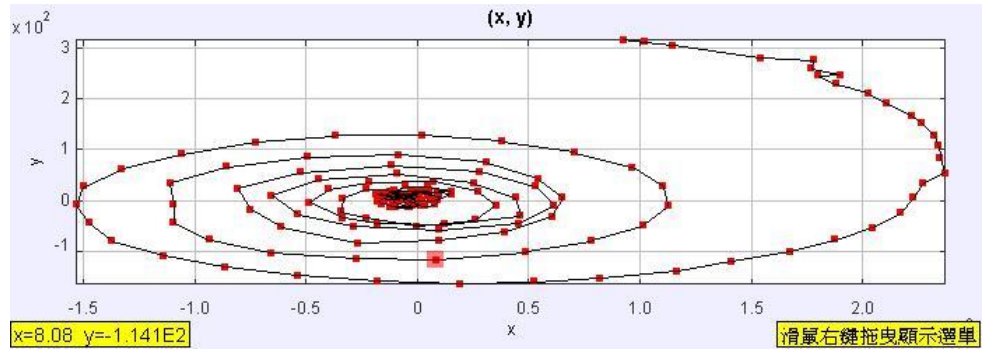


圖 3-2-5 黑色保麗龍球在轉速為 1150rpm 的實際路徑圖

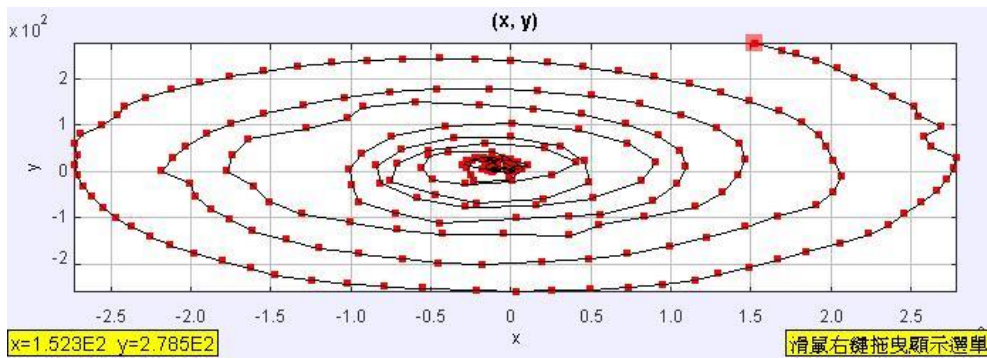


圖 3-2-6 黑色保麗龍球在轉速為 750rpm 的實際路徑圖

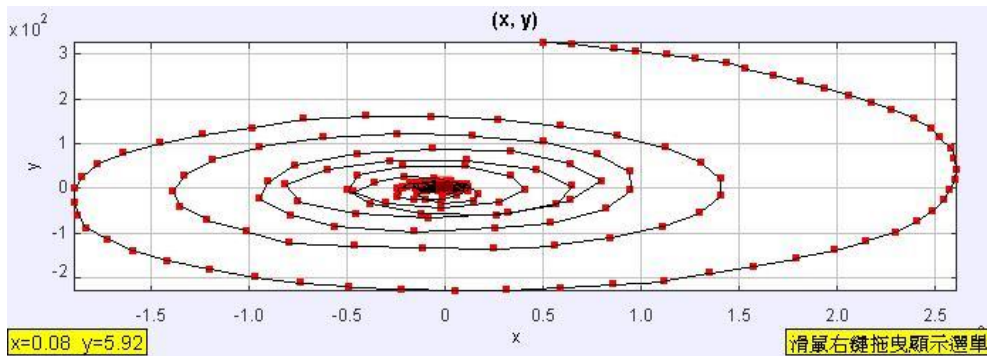


圖 3-2-7 黑色保麗龍球在轉速為 550rpm 的實際路徑圖

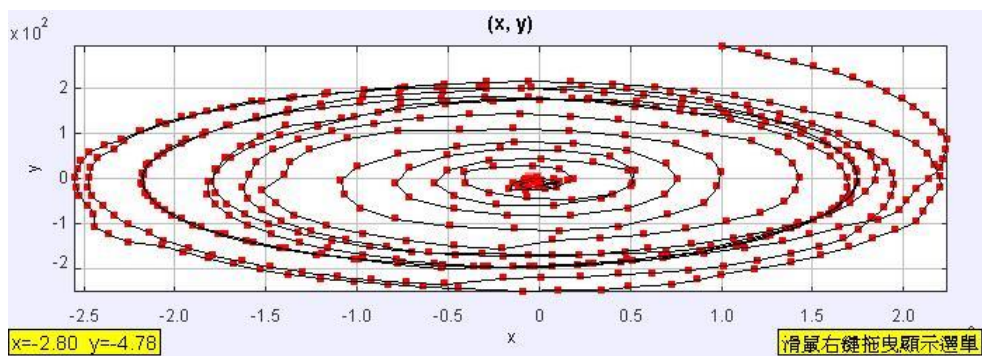


圖 3-2-8 黑色保麗龍球在轉速為 360rpm 的實際路徑圖

3-2-2 【實驗二】 結果討論

(一)我們將黑色絕緣膠帶纏繞在保麗龍球上以增加其質量，藉高速攝影機攝影其移動路徑，以模擬漩渦發生時的水流運動情形，發現與之前所做的藍色保麗龍球的路徑圖明顯不同，在 1150rpm、750rpm、550rpm 不同轉速下的黑色保麗龍球，其運動軌跡循漩渦路徑由外向內漸漸旋入(如圖 3-2-5~圖 3-2-8)，然而，在轉速為 360rpm 之下(如圖 3-2-8)，卻出現如藍色保麗龍球在被旋入前先旋出的現象。由此，我們推論在磁石的旋轉速度為 360rpm 以下所造成的自由渦流，其外圍漩渦速度太小以至於無法提供足夠的向心力將保麗龍球吸入，故有旋出現象發生；當保麗龍球旋至半徑較小處，因渦流速度漸增達到能將球旋入之臨界速度，故此時保麗龍球能直接被吸入至漩渦中心。

(二)本實驗結果顯示，磁石的旋轉速度在 550rpm 以上所造成的自由渦流皆可使黑色保麗龍球直接由外向內漸漸旋入。意即此轉速下形成之自由渦流，雖然 Δh (如下式)較小，但仍能提供足夠大向心力，產生之外圍渦流速度 v ，仍能將保麗龍球吸入。

3-3 【實驗三】 以不同的障礙物模擬橋墩，探討其漩渦及紊流之現象

3-3-1 【實驗三】 資料分析如圖 3-3-1~3-3-8



圖 3-3-1 水流流經壓克力正三角柱的變化



圖 3-3-2 水流流經壓克力正方柱的變化



圖 3-3-3 水流流經壓克力正五角柱的變化

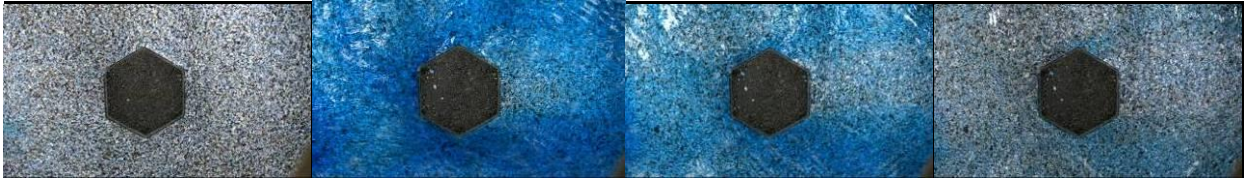


圖 3-3-4 水流流經壓克力正六角柱的變化

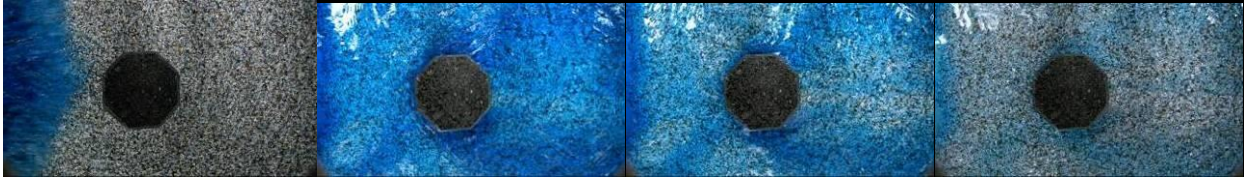


圖 3-3-5 水流流經壓克力正八角柱的變化



圖 3-3-6 水流流經壓克力長方柱的變化



圖 3-3-7 水流流經壓克力圓柱的變化

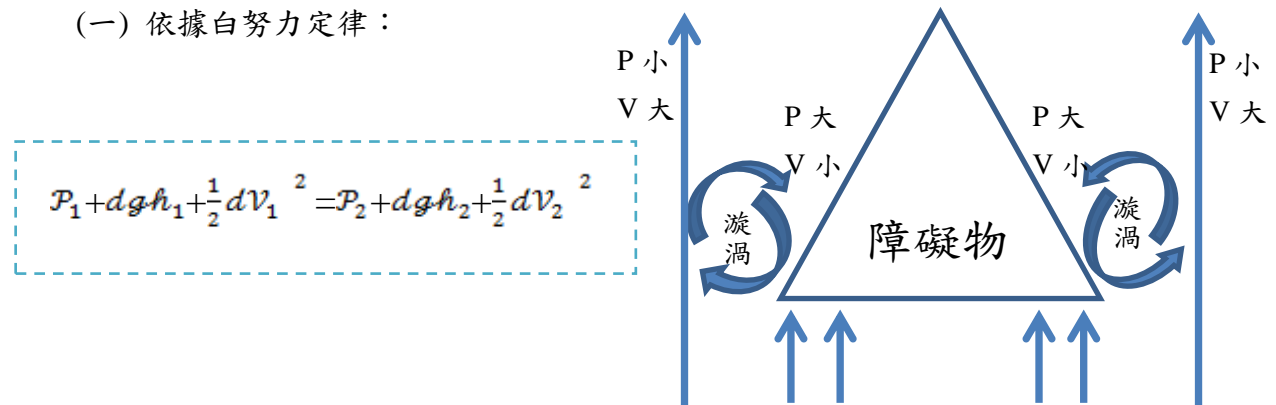


圖 3-3-8 水流流經壓克力橢圓柱的變化

3-3-2 【實驗三】結果討論

本實驗每次放出的水量都相同，且藉由控制水匣門高度約為 0.3 公分。

(一) 依據白努力定律：



流體在空間運動時，其壓力、速率與所處之高度間，若不計接觸壁及空氣阻

- 力之影響，可推得流速愈快的地方，其壓力愈小，因本實驗 d 、 g 、 h 皆不變，故得到 P 與 V 的平方成反比。當水流遇道障礙物時，因受到阻礙而流速減小，故造成轉角處的壓力較大，形成一力量促使水流往外流出，但旁邊的水流又不斷遞補進來，則此剪力產生我們所觀察到的漩渦，分別在障礙物兩側產生順時鐘與逆時鐘的漩渦，又根據旋度的定義及公式，可知順時鐘的漩渦會有一向下的拉力帶動水流，逆時鐘的漩渦則會產生一向上的推力。由此推論，在自然界中，當北半球的水流流經溪中的大石，產生順時鐘漩渦之處較產生逆時鐘漩渦之處危險，故人若處於順時鐘之漩渦內，較有被捲入之虞。
- (二)由圖 3-3-1~圖 3-3-8 所拍攝之連續水流經障礙物圖片，顯示水流流經每個障礙物前方時，迎水面受水流直接沖刷，並因障礙物阻隔形成馬蹄狀的水波，覆蓋障礙物近出水口側的外圍。
- (三)由圖 3-3-1~圖 3-3-8 所拍攝之連續水流經障礙物圖片，可觀察到在正三角柱、正方柱、正五角柱、正六角柱、正八角柱及長方柱兩側近出水口的底面角處，水流量較大也較湍急，產生迴旋的水流，即紊流及漩渦。而每個障礙物流經該處的水流顏色較深，表示該區域之沙子已被侵蝕並產生低窪處。
- (四)由圖 3-3-1~圖 3-3-8 所拍攝之連續水流經障礙物圖片，顯示水流經障礙物時產生分流，並匯聚於障礙物後方不遠處，我們推論每個障礙物後方水流顏色較淺，表示該區受水流侵蝕影響較小，使得障礙物後方的沙子較不容易被水流順勢帶走，不易形成低窪處。
- (五)由圖 3-3-1~圖 3-3-8 所拍攝之連續水流經障礙物圖片，可知，圖 3-3-1 的正三角柱之迎水面的接觸長度最大，觀察發現在轉彎處形成的漩渦最明顯，水流顏色也較深；圖 3-3-7 的圓柱之迎水面最接近流線型，水流不容易受到障礙物的阻礙，較能順利通過，因此較不易在轉彎處觀察到漩渦。

3-4【實驗四】以不同形狀之障礙物模擬橋墩，探討水流流過後沙子侵蝕與堆積之情形

3-4-1【實驗四】資料分析

- (一)我們使用 2.5 公分高的沙子作為實驗前的原始沙面，但在實驗過程中發現，有些障礙物的沙高被侵蝕見底，無法得知真實的侵蝕量，為了不造成實驗上的誤差，因此我們最後以 3.5 公分作為沙子的高度，並設定 3.5 公分高的黑線為基準高度，也就是圖表上的 0 公分。我們定義迎向水流的那一面為第一面，然後逆時針依序下去為第二、三面...。圖表中的侵蝕數據為負，堆積數據則為正。每一張圖的取樣點數不同，因考量到不同障礙物的邊長大小，但是障礙物的每一個面取樣間隔都是相同的。我們將攝得之各障礙物侵蝕與堆積情形的照片(以圖 3-4-1 的正三角柱為例)，利用 Motic images plus2.0 軟體進行數據分析後繪製成如右下方的折線圖。

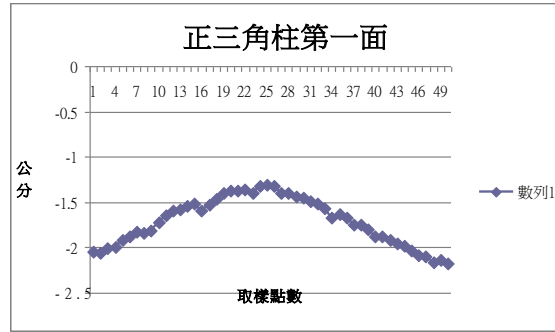
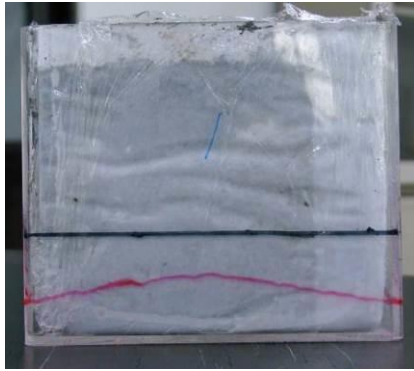
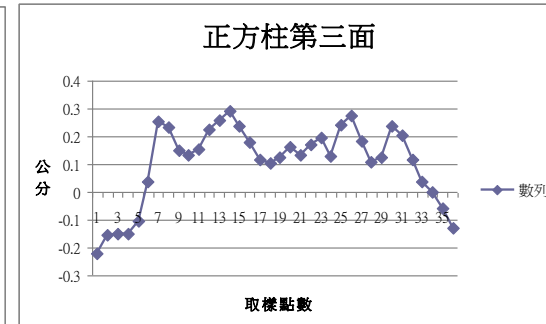
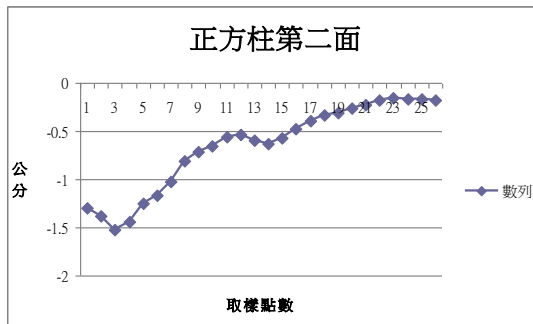
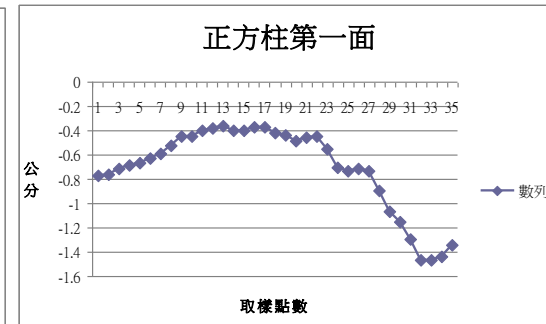
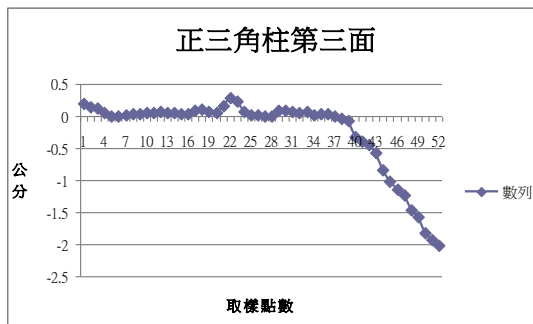
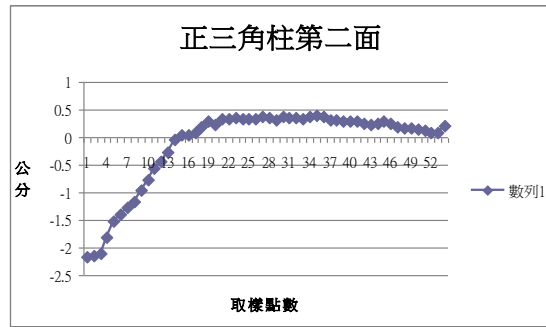
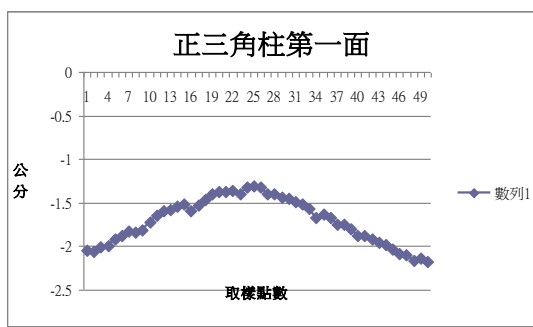
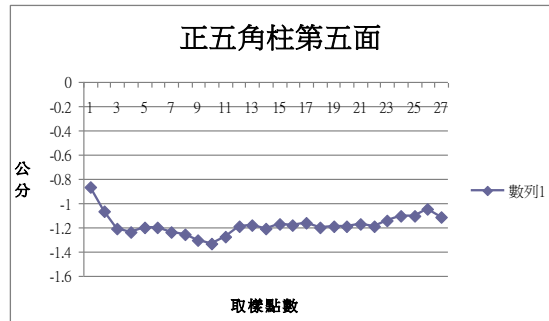
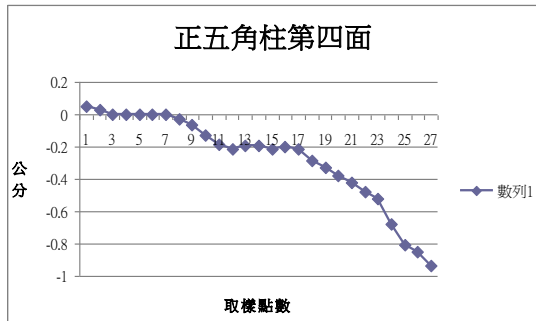
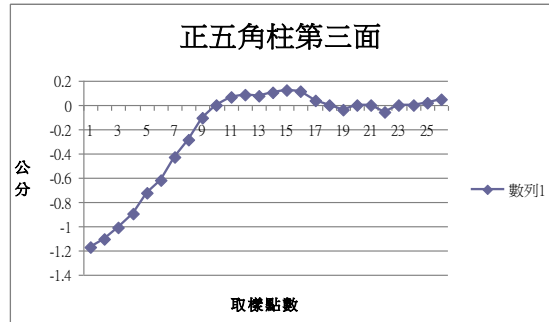
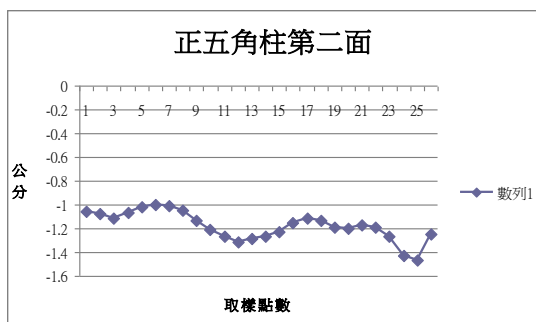
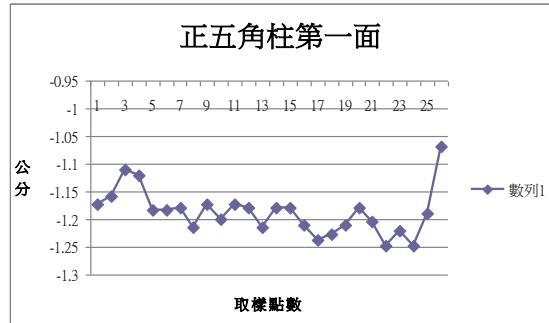
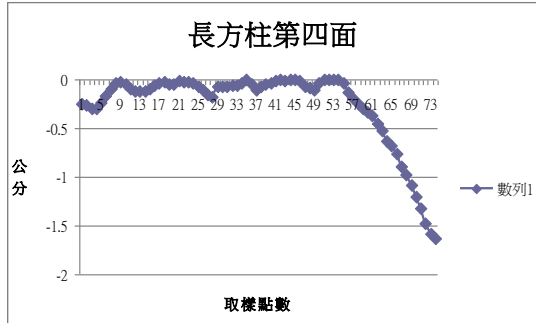
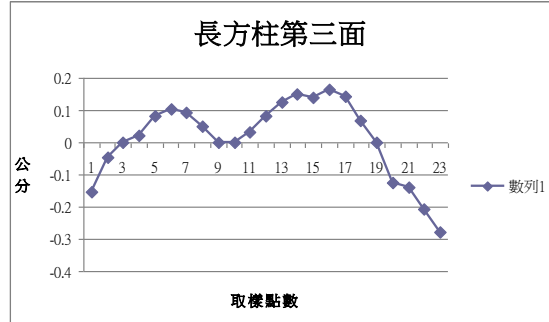
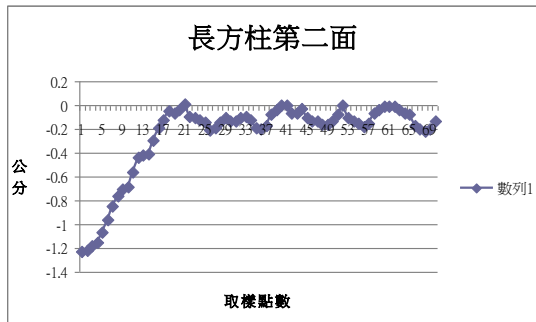
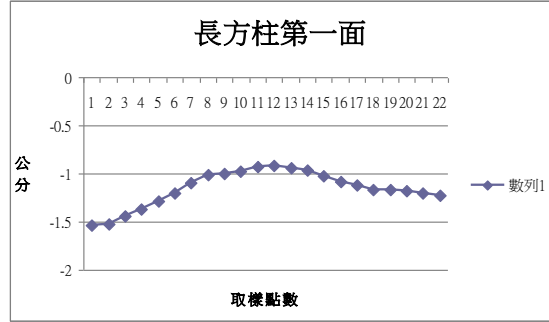
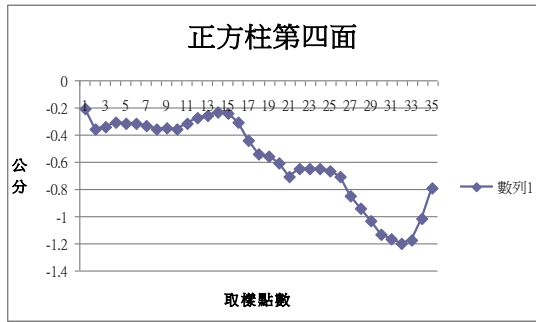
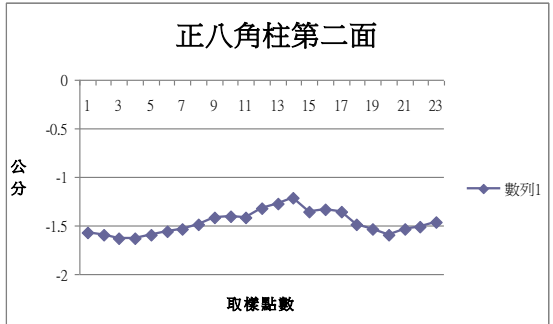
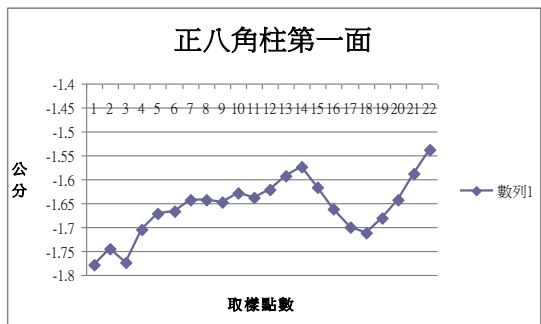
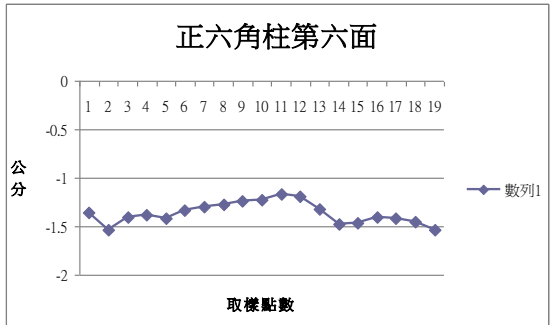
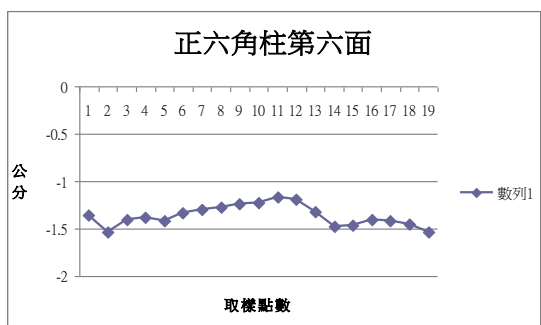
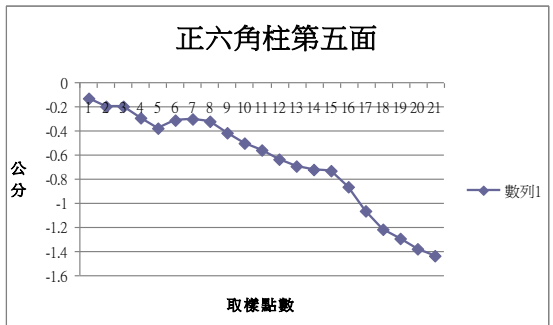
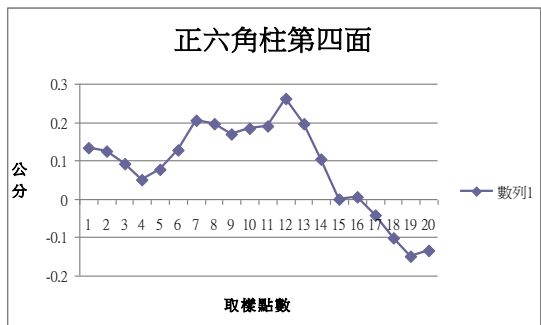
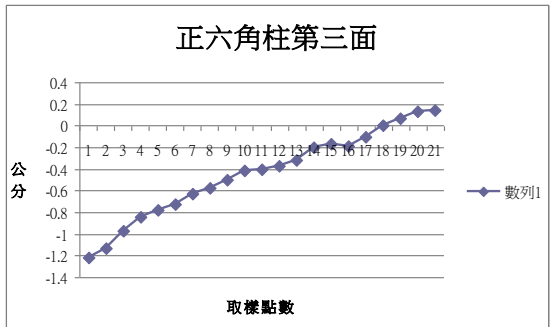
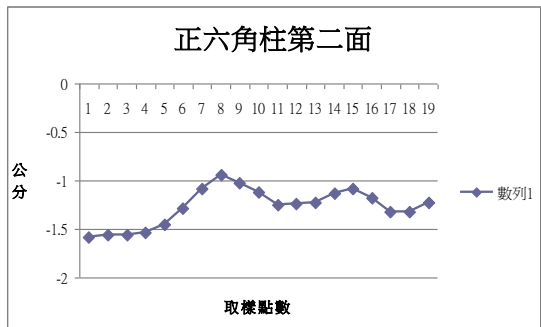
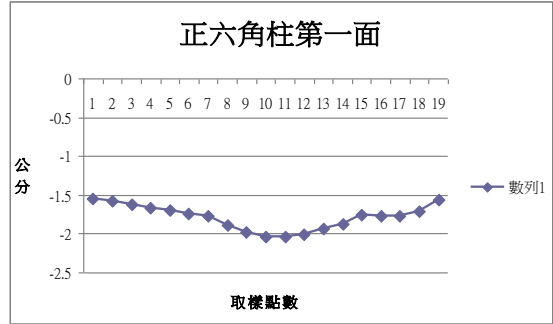
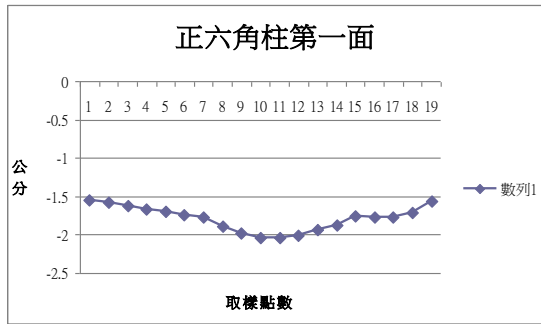


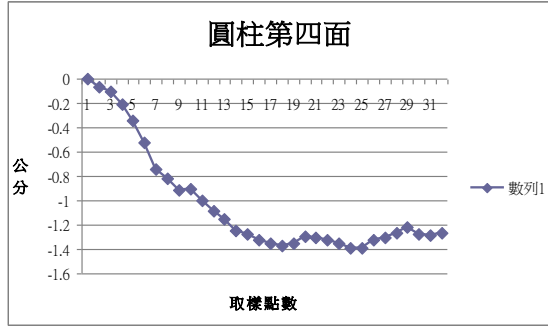
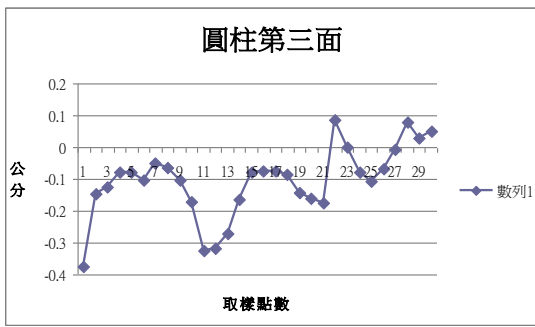
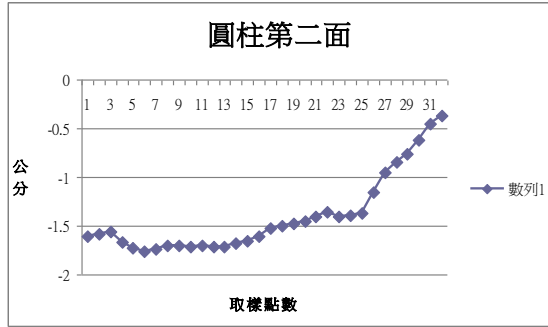
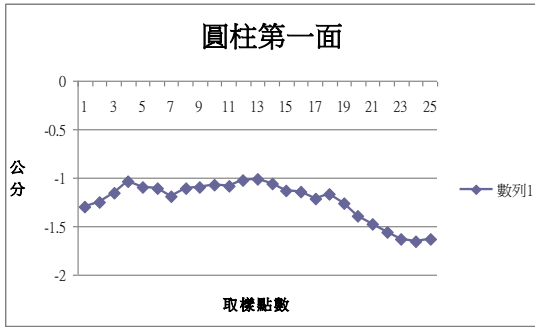
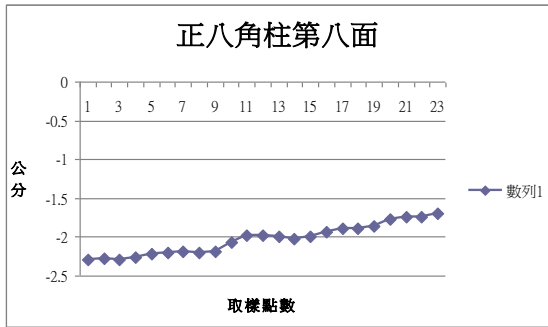
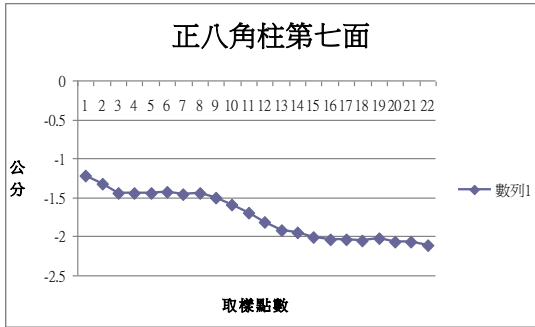
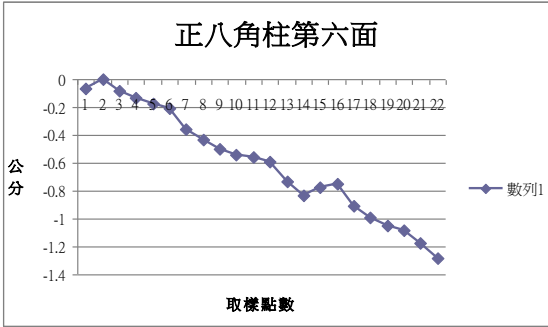
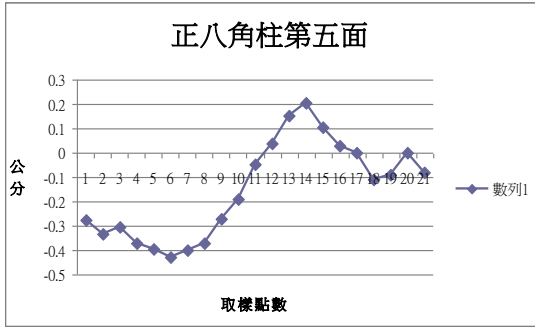
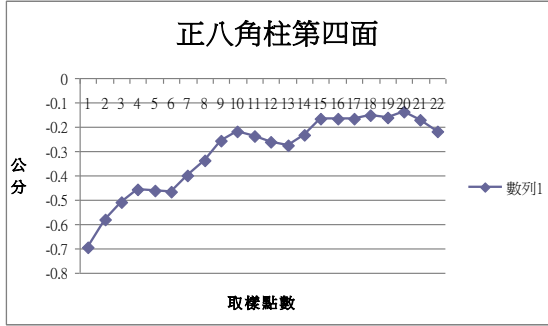
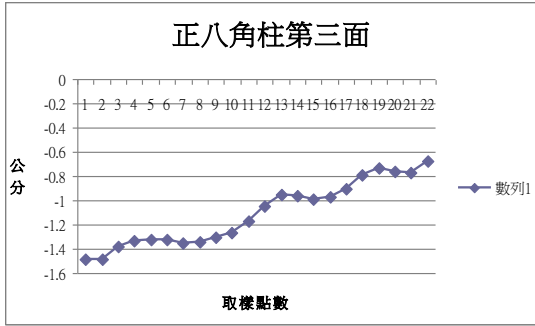
圖 3-4-1 障礙物侵蝕堆積圖

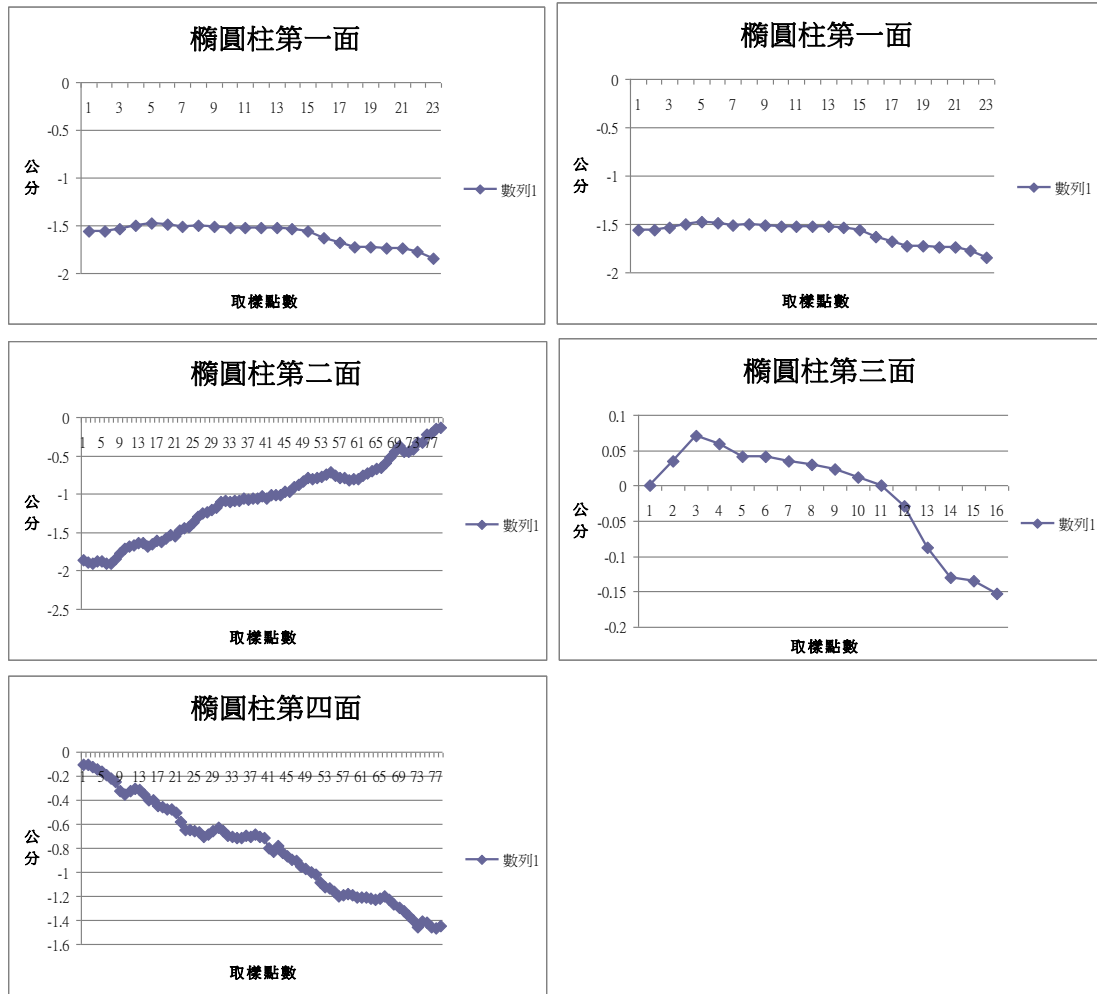
下方為正三角柱、正方柱、長方柱、正五角柱、正六角柱、正八角柱、圓柱及橢圓柱每一面的侵蝕及堆積量折線圖。











(二) 將每個礙物受水流侵蝕與沉積之數據整理如表 3-4-2，表中「左」代表順水流方向在障礙物迎水面的左側，「右」代表順水流方向在障礙物迎水面的右側。

表 3-4-2 不同形狀之障礙物侵蝕及堆積量數據(單位公分)

類型		位置	迎水面	兩側近出水口處	兩側遠出水口處	背水流面平均侵蝕或堆積量
正三角柱	左		-2.07	-2.02	+0.29	
	右		-2.16	-2.17	+0.39	
正方柱	左		-0.78	-1.2	-0.21	+0.11
	右		-1.47	-1.53	-0.26	
長方柱	左		-1.54	-1.63	-0.08	+0.13
	右		-1.22	-1.22	-0.10	
正五角柱	左		-1.18	-1.15	-1.20	+0.04
	右		-1.25	-1.11	-1.50	
正六角柱	左		-1.57	-1.53	-1.53	+0.08
	右		-1.70	-1.58	-1.32	

正八角柱	左	-1.78	-1.80	-1.27	-0.15
	右	-1.62	-1.63	-0.72	
圓柱	左	-1.27	-1.30	-0.51	-0.10
	右	-1.65	-1.66	-0.66	
橢圓柱	左	-1.50	-1.44	-0.16	-0.01
	右	-1.73	-1.88	-0.33	

3-4-2 【實驗四】結果討論

以下將每一個不同形狀的模擬橋墩障礙物進行討論，結果如下：

- (一)正三角柱：第一面受沖刷後左右兩側侵蝕較為嚴重，侵蝕高度分別為 2.07 公分及 2.16 公分，我們推論是因為漩渦產生在兩側的緣故。第二面靠近出水口的那側，明顯可看出大量侵蝕，侵蝕最劇可達 2.17 公分，越遠離出水口則侵蝕現象驟減，甚至出現小幅度的堆積，堆積有 0.39 公分高。第三面的侵蝕現象與第二面相仿，侵蝕最劇可達 2.02 公分，而堆積則有 0.29 公分高。上述侵蝕量最劇的地方發生在第一面左右兩側及第二、三面近出水口側，與實驗三所觀察到漩渦出現的位置相符。
- (二)正方柱：第一面受沖刷後左右兩側侵蝕較為嚴重，侵蝕高度分別為 0.78 公分及 1.47 公分。第二面靠近出水口的那側，明顯可看出大量侵蝕，侵蝕最劇可達 1.53 公分，越遠離出水口則侵蝕現象減緩。第三面即背水那一側，僅左右兩側受到小幅度的侵蝕，分別為 0.22 公分及 0.13 公分，其餘部份則產生堆積達 0.1~0.3 公分。第四面與我們預期的結果相同，產生與第二面對稱的相仿侵蝕現象，侵蝕最高達 1.2 公分，但愈遠離出水口，侵蝕現象依舊逐漸減緩。
- (三)長方柱：第一面受沖刷後左右兩側侵蝕較為嚴重，侵蝕高度分別為 1.54 公分及 1.22 公分。第二面在靠近出水口的那側侵蝕高度最高達 1.22 公分，往後則驟減至 0.2 公分，我們推論應是側面較長沒有漩渦產生的緣故。第三面完全背對水流，只有在左右兩側有些微的侵蝕，侵蝕高度分別為 0.15 及 0.28 公分，第三面在中間處產生堆積，堆積高度最高達 0.16 公分。第四面由於跟第二面同時接觸到水流的緣故，所以在堆積上有相似的情形，在靠近出水口的那側侵蝕接近 1.63 公分，兩面侵蝕量大致呈對稱分佈，理論上應符合水流等量中分流經障礙物兩側，但實際上第四面與第二面侵蝕量差距 0.4 公分，我們推論之所以侵蝕量有差異的原因為水流流經第一面即產生差異侵蝕，左右兩側侵蝕量相差 0.32 公分，之後水流再分別轉流向第二及第四面時，因第一面左側初始侵蝕速度較快，造成沙面較低，導致後續水流往第四面近出水口側匯流，持續帶走沙子才產生較大侵蝕量。
- (四)正五角柱：第一面受沖刷後的侵蝕情形左右兩側相差不大，整面侵蝕量平均為 1.19 公分。第二面與第五面同時接觸到來自第一面的水流，因此延續第一面的侵蝕量，且兩面的侵蝕狀況相仿，平均分別為 1.18 公分及 1.15 公分。

第三面與第二面相連處的侵蝕量最劇達 1.175 公分，堆積則有 0.12 公分。第四面與第五面相連處的侵蝕量最劇達 0.94 公分，堆積則有 0.05 公分，我們推論第三面與第四面的侵蝕量之所以差異不大，應為左右側水流對稱之故。上述第三面及第四面侵蝕量的變化，可推測漩渦應出現在第二、三面及第四、五面相連的轉角處，與實驗三所觀察到正五角柱漩渦出現的位置相符。

- (五)正六角柱：第一面受沖刷後的侵蝕量平均為 1.79 公分，中間處較嚴重，達 2.05 公分，左右兩側則相當平均。第二面及第六面近出水口側侵蝕量分別達 1.58 公分及 1.53 公分，遠出水口側侵蝕量分別達 1.32 公分及 1.53 公分，因兩面同時接觸到水流，故在侵蝕情形上有相似狀況，均發生越往後方侵蝕越緩的現象，故推論應是水流沖刷所造成的結果。第三面及第五面侵蝕量亦相仿，兩面較靠近出水口的那側侵蝕較劇烈，亦有越往後方侵蝕越緩的趨勢，可能因為此轉角處出現漩渦的緣故，此恰與我們實驗三中所觀察正六角柱產生的漩渦位置相符。第四面是背水流面，水流在左側至中間段造成堆積，堆積高度平均達 0.15 公分高，右側則有微量侵蝕現象，最高僅 0.15 公分。
- (六)正八角柱：第一面受沖刷後的侵蝕量平均達 1.66 公分。第二面與第八面同時接觸到水流，第二面近出水口側的侵蝕量達 1.63 公分，但第八面的侵蝕量卻高達 2.29 公分；且第二面與第三面連接處侵蝕量達 1.49，與其對稱之第八面及第七面的侵蝕量卻達 2.12 公分；我們推論之所以侵蝕量有差異的原因為水流流經第一面後，分別轉向第二及第八面時即產生差異侵蝕，兩側侵蝕量相差 0.66 公分，之後水流再分別轉流向第三及第七面時，侵蝕量仍達 0.63 公分，差異侵蝕的原因為第一面左側初始侵蝕速度較快，造成沙面較低，導致後續水流往第八面、接續第七面匯流，持續帶走沙子才產生較大侵蝕量。第四面及第六面與第三面及第七面的狀況相似，越遠離出水口侵蝕量就越少，但第六面的侵蝕量卻比較大，我們推論應是第二面與第八面的差異侵蝕現象延續至第四面與第六面。第五面侵蝕情形不太規則，左側侵蝕最劇達 0.43 公分，中間段則是堆積達 0.2 公分，右側則又再度侵蝕達 0.1 公分。
- (七)圓柱：第一面受水流直接沖刷後，整個迎水面的侵蝕量皆介於 1 到 2 公分之間，最大侵蝕量發生在右側，達 1.66 公分。當水流沿著流線型的圓柱向後繼續沖蝕，第二面與第四面延續第一面的侵蝕量，最高分別達 1.76 公分及 1.39 公分，且兩面的侵蝕狀況均有向後逐漸遞減的趨勢。第三面侵蝕作用微弱的背水流面，侵蝕量最大僅 0.380 公分，堆積作用亦不明顯，最高僅達 0.090 公分。我們推論應為水流經障礙物後，產生紊流而對迎水面及其接續面進行侵蝕，並將所侵蝕之沙子搬運至圓柱後方形成堆積。
- (八)橢圓柱：第一面受水流直接沖刷後，整個迎水面的侵蝕量皆介於 1.5 到 2 公分之間，最大侵蝕量發生在右側，達 1.82 公分。當水流沿著流線型的橢圓柱向後繼續沖蝕，第二面與第四面延續第一面的侵蝕量，最高分別達 1.91 公分及 1.46 公分。我們推論因為橢圓柱兩側側面長度較長，當水流侵蝕到側面後段時，侵蝕力已減小，故其兩側面的侵蝕狀況均有向後遞減的趨勢。第三面為背水流面，其侵蝕作用十分微弱，最大僅 0.15 公分；積作用亦不

明顯，最高僅 0.07 公分。推論此現象應為水流經障礙物後，產生紊流對迎水面及其接續面進行侵蝕，並將所侵蝕之沙子搬運至橢圓柱後方形成堆積。

小結：

- (一) 由各障礙物受水流侵蝕量之數據，發現障礙物迎水面的侵蝕較嚴重，應為迎水面受水流直接沖刷的緣故。又障礙物底面角後方均發生大量侵蝕之現象，推論應為漩渦及紊流所造成；障礙物被水側的侵蝕量較少，甚至有堆積現象發生，推論應為水流將在兩側侵蝕之沙子搬運並堆積於此。
- (二) 正三角柱之迎水面底角後方的侵蝕量最大，推論由於其迎水面與水的接觸長度最長，故在轉彎處產生明顯漩渦進行侵蝕作用；圓柱的侵蝕量並不平均，推論其迎水面最接近流線型，水流較能直接通過，並順勢進行侵蝕。
- (三) 我們發現長方柱迎水面的長度較小，側面長度較長，故即使漩渦形成在第一個轉彎處，對側面的侵蝕影響仍不大，綜合以上數據結果，推論若單就侵蝕方面，橋墩為長方柱應能達到最佳抗侵蝕效果。但工程上可能須考慮到阻力情形及其他長方柱無法克服的相關因素，因此生活中的橋梁設計上才大多使用圓柱型橋墩。

3-5【實驗五】以不同形狀的障礙物模擬橋墩，探討水流流過後的波紋與流場之變化

3-5-1【實驗五】資料分析

藉由觀察投影在紙屏上的波紋變化，我們試著找出水流流經障礙物時的流場變化，並藉此與實驗四所做出的數據進行比對與分析。實驗五中，我們利用高速攝影機拍攝圓柱、橢圓柱、長方柱及正三角柱周圍的流場變化，並取正三角柱波紋及流場圖作為代表，如圖 3-5-1。

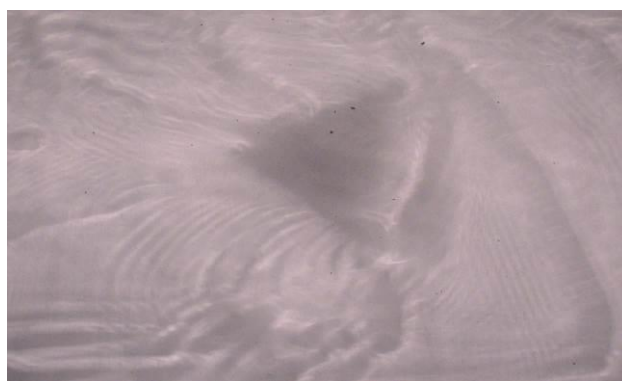


圖 3-5-1 正三角柱波紋及流場圖

3-5-2【實驗五】結果討論

於實驗四中，我們發現長方柱的抗侵蝕能力較圓柱及橢圓柱佳，但是生活中的橋墩大多都為圓柱狀，這令我們感到非常疑惑，於是我們決定試著找出不同形狀之橋墩是如何影響水流的流場變化，進而發生堆積與侵蝕的現象。

根據橋墩沖刷理論中，水流流經圓柱形橋墩的流況可分為：墩前壅水、墩前的向下射流、馬蹄型渦流及尾跡渦流，如圖 3-5-2 及圖 3-5-3 所示。當均勻水流流經橋墩時，受到橋墩的阻礙，周圍流場於是產生變化，即部分沖刷，其中向下射流及馬蹄型渦流為影響橋墩局部沖刷深度的主要原因。

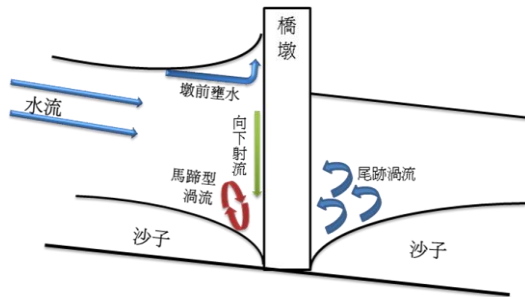


圖 3-5-2 橋墩周圍流況的側視圖

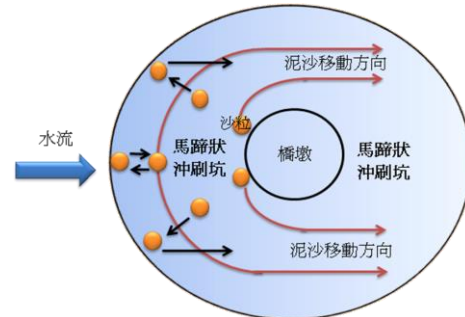


圖 3-5-3 橋墩周圍流況的俯視圖

- (一)藉由觀察我們投影在紙屏上之波紋變化的影片，明顯可以看出迎水面有亮暗紋連續不斷的跳動變化，我們發現當水流遇到障礙物，發生反射的現象，我們推論反射後的水波會有往上及向下的流場產生，這就如同上述所提到的墩前壅水及向下射流，而我們皆可以從目前所做的四種柱體的影片中觀察到此現象。
- (二)由實驗五所拍攝的影片中，我們觀察到圓柱及橢圓柱皆會產生馬蹄型渦流，但是長方柱及正三角柱卻無法明顯觀察到此現象，而此種渦流會將障礙物周圍的沙子捲起，捲起的沙子又順著主要的流場被攜帶至他處，於是產生沖刷侵蝕的現象，故我們推論馬蹄型渦流是造成圓柱及橢圓柱兩側面侵蝕較長方柱及正三角柱嚴重的主要原因。
- (三)由文獻資料得知，尾跡渦流通常都是出現在背水側，而此渦流會將部分迎水側與兩側被侵蝕帶至背水側的沙子，向上捲起並往前堆積，又對照實驗四的實驗數據，我們推論應是尾跡渦流造成背水側的侵蝕情形較不嚴重，甚至有堆積的現象產生。
- (四)藉由實驗五的投影觀察及記錄，我們畫出正三角柱、長方柱、圓柱及橢圓柱的主要水流流場變化圖，如圖 3-5-4~圖 3-5-7。

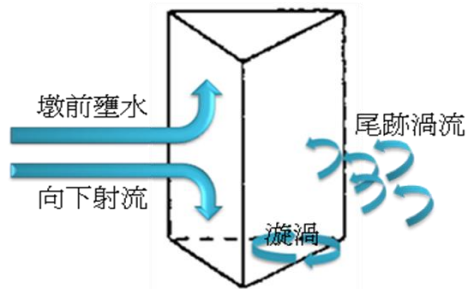


圖 3-5-4 正三角柱流場圖

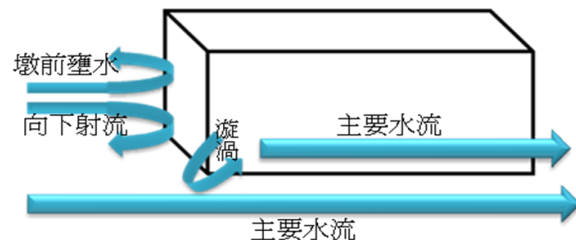


圖 3-5-5 長方柱流場圖

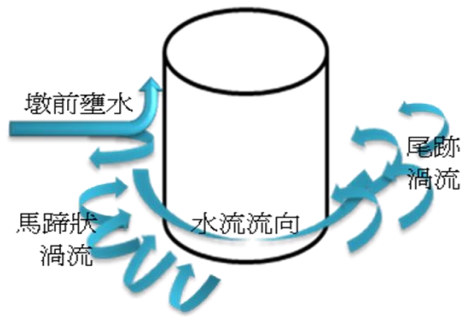


圖 3-5-6 圓柱流場圖

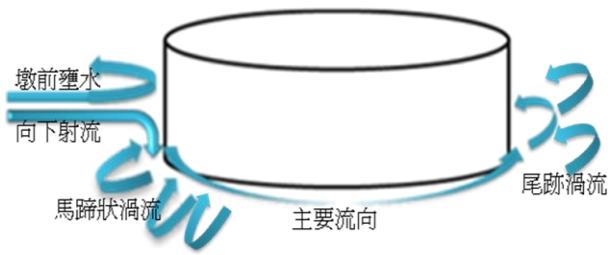


圖 3-5-7 橢圓柱流場圖

最後，將實驗三、四、五進行統整，比照實際野外調查所拍攝的橋墩，圖 3-5-8 所拍攝為宜蘭蘭陽溪中游葫蘆堵大橋橋墩，明顯可以看出橢圓形橋墩外圍由馬蹄型渦流所造成的侵蝕現象。圖 3-5-9 為下游蘭陽大橋的橋墩，堆積作用旺盛。圖 3-5-10 為泰雅大橋，由圖中可看出橋墩受到強烈侵蝕均已裸露，經了解發現為上游不斷開採砂石之緣故，造成沉積物供應不足因而破壞了河川侵蝕與沉積的平衡。



圖 3-5-8 葫蘆堵大橋橋墩



圖 3-5-9 蘭陽大橋橋墩



圖 3-5-10 泰雅大橋橋墩

3-6 綜合討論

(一) 橋墩為何設計成(橢)圓柱而非三角柱?

從結構設計方面考量，可知因為橋墩中所配鋼筋具有連接性，從橋墩基礎配筋設計，通過墩身到橋面主體，三角柱設計對於鋼筋結構上的配置會產

生困難。

(二) 橋墩為何設計成(橢)圓柱而非長方柱?

從流體力學方面考量，可推知長方柱(形)設計因第一接觸面較小，可使水流快速通過，但墩身與水流接觸面小如遇漂流物(如巨木與大石)撞擊，其結構將更容易被破壞。

肆、結論

(一) 欲藉由質點觀察漩渦運動路徑時，若質點質量太小會發生旋出現象，無法完整代表漩渦運動路徑。質點質量大者，其浮力大，和水接觸的體積亦大，因此較易被漩渦水流影響而向內旋入，可完整觀察漩渦運動路徑及性質。

(二) 磁石由燒杯中央傳遞能量帶動水流旋轉，此能量進而傳遞給更外圍的水流，因此中心的速率、動能及角速度均最大而外圍速率漸小，符合自由渦流原理。

(三) 磁石攪拌器轉速過小(360rpm 以下)，質點會因漩渦向心力不足而發生旋出現象；轉速在 550rpm 以上所形成之自由渦流，即使 Δh (如下式)較小，仍能提供足夠的向心力，使質點由外向內旋入。

$$\rho g \Delta h A = \rho (A \Delta X) \frac{v^2}{R}$$

(四) 水流直接沖刷障礙物之迎水面，並受阻形成馬蹄狀水波，產生分流現象，後匯聚於障礙物後方不遠處，故推論障礙物後方水流顏色較淺為受水流侵蝕影響較小處。

(五) 水流流經障礙物轉彎處，利用白努力定律知當其流速較小，壓力則較大，而此壓力差造成水流形成漩渦，故轉彎處水流顏色較深，表示該區域之沙子已被侵蝕並產生低漥處。

(六) 當水流遇到障礙物，發生水波反射的現象，同時形成墩前壅水及向下射流。尾跡渦流多出現於背水側，將部分迎水側與兩側被侵蝕而帶至後方的沙子，向上捲起並堆積於背水側。

(七) 愈接近流線型的障礙物，向下射流及馬蹄狀渦流易對橋墩進行沖蝕，但水流不易受阻，故不易在轉彎處觀察到漩渦。

(八) 長方柱於第一個轉彎處形成漩渦，但未出現馬蹄形渦流，因此側面的侵蝕程度較流線型者為小，故若單就侵蝕方面來說，長方柱橋墩應能達到最佳抗侵蝕效果。

伍、未來展望

(一) 目前我們無法直接在實驗三的實驗裝置中放入待測物並利用 tracker 軟體追蹤之，亦無法分析水流變化，因此現今僅能定性的觀察及描述漩渦出現的位置，希望未來能找出方法分析測量，進而得知在障礙物附近水流的真

正流況，是否真的如同我們定性觀察到的一樣，抑或有其他不同的現象。

參考文獻

- 王證凱、楊超傑、吳鎮宇(2005)。橋墩追追追~橋墩抗水能力與砂石淘空情形探討。高雄市立陽明國中，全國中小學科展生物及地球科學科國中組，高雄市。
- 黃麗玫、王瑞筠、張淑芬、張秀敏(1982)。漩渦及石頭。台灣省立嘉義女子高級中學，高中組地球科學組，嘉義市。
- 鄭聰信 (2006)。橋墩沖刷保護機構之現地實驗與探討。國立成功大學，水利及海洋工程研究所碩士論文，台南市。
- 魏妙珊、魏苗山(2009)。三維海嘯湧潮對近岸結構物之影響。國立中央大學，水文與海洋科學研究所碩士論文，桃園縣。
- 陳紀諭(2009)。弧形保護工對減少橋墩局部沖刷水工模型試驗，P9。國立成功大學，土木工程研究所，台南市。