

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 地球科學科

佳作

030509

探究離岸風機水下基礎之穩固度～以雲彰沙脊  
北側海域為例～

學校名稱：臺北市立蘭雅國民中學

作者：  國三 蘇詠晴  國三 朱柏睿  國三 許瑋恩	指導老師：  郭青鵬  陳政儀
---	-----------------------------

關鍵詞：地層結構、水下基礎、震度

# 摘要

本研究以雲彰沙脊北側海域為對象，透過觀察風機模型的傾斜角度，來探究該震度、地層結構粒徑大小及風機水下基礎結構之間的交互關係。

我們分析實驗數據後發現，離岸風機的傾斜角度和震度呈正相關，也發現當水深大於沉積物深度時，風機模型傾斜角度會有明顯的變化。且我們發現當上層砂石孔隙率越高時，風機越容易發生傾倒的狀況。而後，我們也比較四種不同的水下基礎結構，並以單樁式為原型，優化出了三種不同的水下基礎結構，最後也透過改變接觸砂石的表面積，改善了風機的穩固度。

## 壹、研究動機

臺灣海峽擁有許多優良的離岸風機場址，但因台灣地震頻繁，且西部沙岸地質較鬆散，我們認為在地震發生時，風機會有傾斜的風險。而目前對於風力場址的評估，多僅考量風能，因此我們希望透過此實驗，找出影響風機穩固度的變因，並減少地震發生時的風險。

由於近年來離岸風機有越建越高的趨勢，所以用於固定水下基礎更顯重要，且水下基礎也是整個風機結構中最昂貴的元件，因此我們希望透過優化結構設計及研究地層結構等因素，來達到最佳的經濟效益及穩固度。

## 貳、研究目的

- |                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 一、探討不同振動頻率(RPM)對於單樁式水下基礎穩固度之影響 | (實驗一) |
| 二、探討不同水深對於單樁式水下基礎穩固度之影響        | (實驗二) |
| 三、探討不同砂石組成對於單樁式水下基礎穩固度之影響      | (實驗三) |
| 四、探討不同的水下基礎結構對於水下基礎穩固度之影響      | (實驗四) |






## 參、研究設備及器材

### 一、設備儀器：

3D 列印機台(金儀 M-3D-FLUX)、水平式地震模擬器(MS-NRC-30)、手機、積木手機架

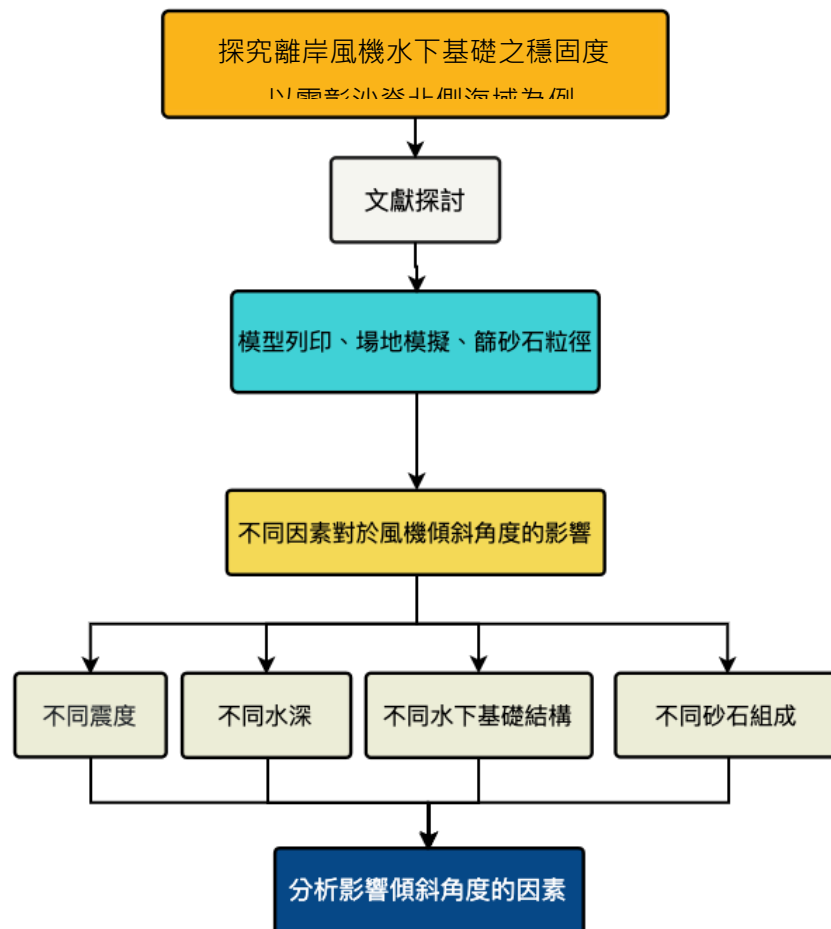
### 二、材料工具：

細砂、麥飯石、活性炭、篩網、透明觀察箱、砂磨機、海綿、直尺、熱熔膠槍

				
篩網	水平式地震模擬器	麥飯石	細砂	活性炭

## 肆、研究過程與方法

### 一、實驗流程圖：

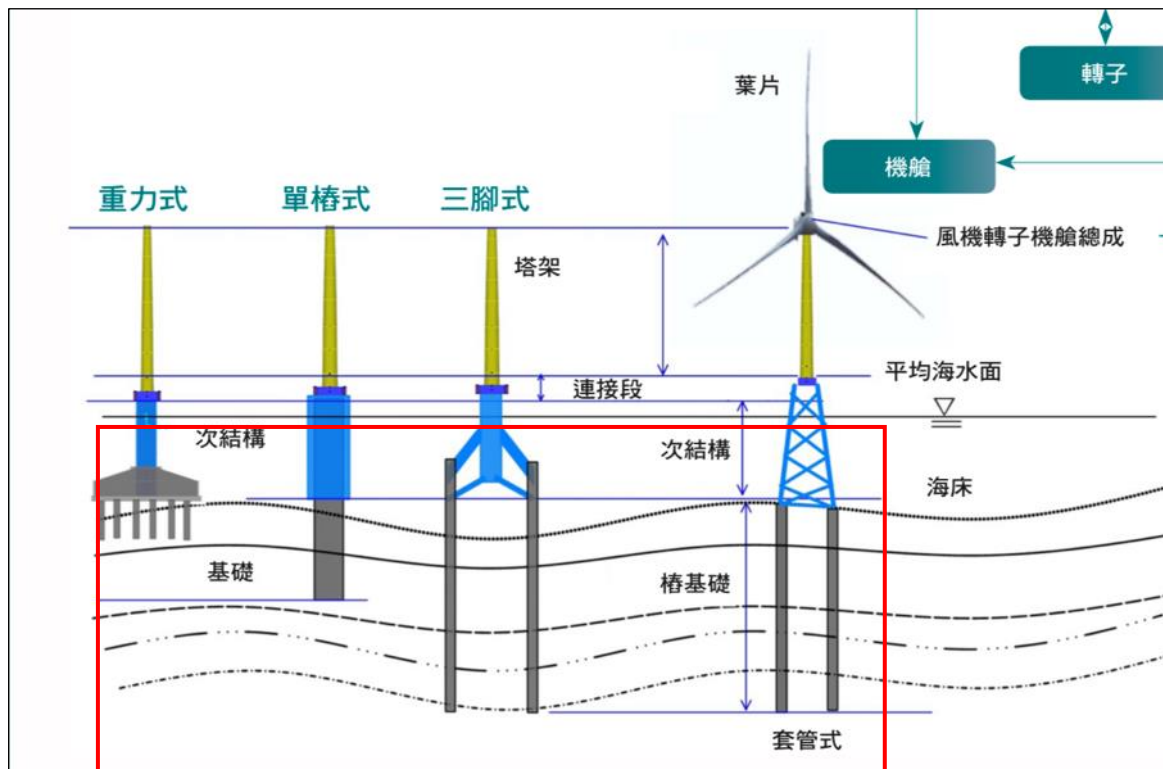


## 二、文獻探討：

文獻探討將介紹國際上現有離岸風機水下基礎之形式，說明臺灣離岸風場之潛能與研究地區之地質概述，最後說明臺灣地震震度的設定與本研究震度計算原理等，詳述如下。

### (一) 水下基礎：

比起陸域，離岸風機的優勢是風能較為足夠且穩定，但考量颱風、地震等因素，就需要更加穩固的水下基礎，目前利用鑽油平臺的技術，發展出了許多不同構造的水下基礎，本研究探討的對象是用於深度小於 50 公尺的固定式水下基礎：



圖一、現階段實行的水下基礎結構 引用自參考文獻資料七

### (二) 臺灣風場：

臺灣的季風十分強勁，加上中央山脈和中國福建武夷山形成了一條快速風道，使臺灣的平均風速能達到 8m/s，風能密度可達  $1000\text{w/m}^2$ ，約是德國的至五倍半，而且臺灣海峽水深淺，且台灣能設置離岸風機的面積大約有 16500 平方公里，這些條件讓臺灣海峽成為了全球前幾名的優良風場。

臺灣風場主要分布於西部，其中最具優勢的為彰化外海，當地的地形：雲彰沙脊，讓水深特別淺，能夠節省成本，而臺灣的第一座風場則位於苗栗外海。

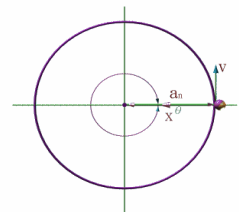
(三) 地震震度計算：

地震震度是某地在地震時人感受到震動的激烈程度或物體所受的破壞程度。中央氣象局在 2019 年重新定義地震震度分級，當震度大於 4 級時，還多參考地動速度 (PGV) 的大小，並把震度 5 級和 6 級再細分為 5 弱、5 強、6 弱、6 強。

表一、地震震度分級表										
震度階級	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 級	6 級	7 級		
PGA	<0.8	0.8~2.5	2.5~8.0	8.0~25	25~80	80~250	250~400	>400		
(cm/sec <sup>2</sup> )										
地震震度階級對照最大地動加速度(PGA)範圍表										
震度階級	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
PGA	<0.8	0.8~2.5	2.5~8.0	8.0~25	25~80	80~140	140~250	250~440	440~800	>800
(cm/sec <sup>2</sup> )										
地震震度階級對照最大地動速度(PGV)範圍表										
震度階級	0 級	1 級	2 級	3 級	4 級	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
PGV	<0.2	0.2~0.7	0.7~1.9	1.9~5.7	5.7~15	15~30	30~50	50~80	80~140	>140
(cm/sec)										

(四) 簡諧運動 (Simple Harmonic Motion)：

本實驗的水平式地震模擬器是進行簡諧運動，當某物體進行簡諧運動時，物體所受的力跟位移成正比，並且力總是指向平衡位置。如果用  $F$  表示物體受到的回復力，用  $x$  表示物體對於平衡位置的位移，根據虎克定律， $F$  和  $x$  成正比，即為下式： $F = -kx$ 。



圖二、簡諧運動示意圖  
引用自參考文獻資料十一

(五) 研究區域地質概述：

台灣海峽依照海底地形由北往南可區分為觀音凹陷、烏坵凹陷、雲彰沙脊、澎湖水道及台灣灘等區域。觀音凹陷位在台灣海峽北部，水深最深可達-100 公尺，是台灣海峽中水深較深的區域；雲彰沙脊位在台中、彰化、雲林外海，水深在-50 公尺以內，地形上大致呈三角形，北側與觀音凹陷相接，西側與烏坵凹陷接壤，南側與澎湖水道相鄰，而本研究區域主要在雲彰沙脊北側往北向觀音凹陷方向延伸，水深大約-50 公尺以內的區域間。研究區域內沉積物根據前人研究與實際的鑽井資料顯示，本區域海床下 0~-30 公尺主要以砂和粉砂互層為主，-30 公尺以下則以堅硬黏土層、砂質粉土互層為主。

三、前置作業：

(一) 列印模型：

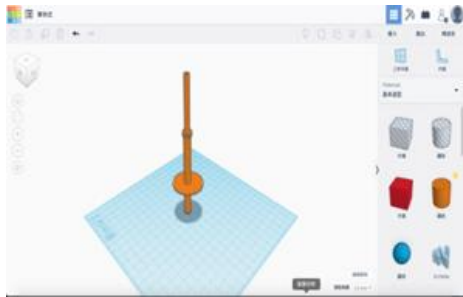
1. 運用製圖軟體 tinkercad 繪製 3D 模擬圖。
2. 以 obj 檔匯出到 flux studio 控制 3D 列印機運作，列印出不同結構的水下基礎模型。



圖三、列印軟體  
flux studio



圖四、繪圖軟體  
tinkercad



圖五、tinkercad 設計頁面

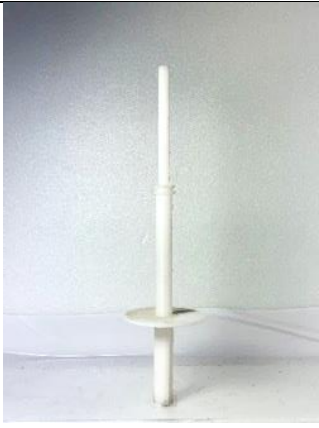
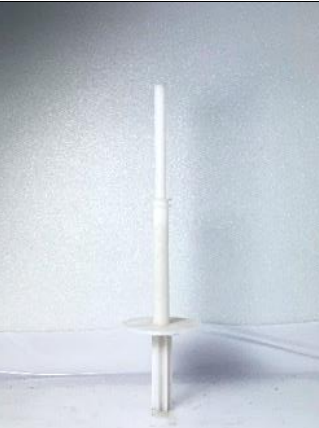
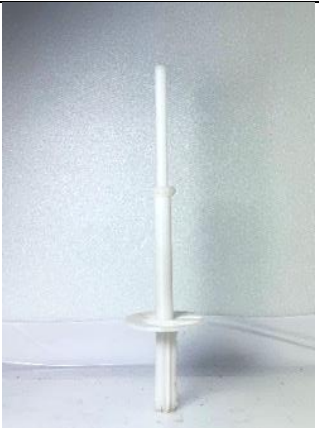

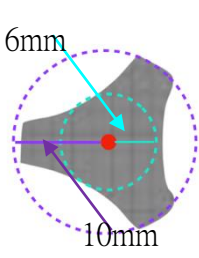
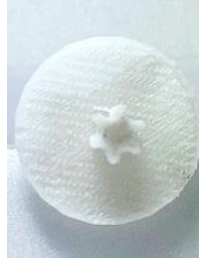
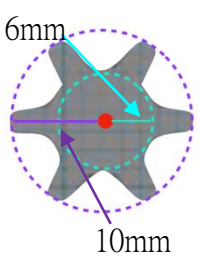

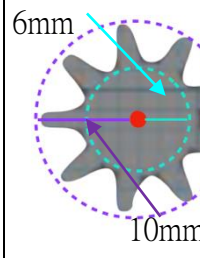


圖六、flux studio 列印頁面

表二、不同種類的風機水下基礎及其模擬圖			
單樁式	套管式	扭轉套管式	三腳式



表三、不同種類的單樁式水下基礎圖

三角式		六角式		九角式	
					
					

(二) 砂石分析：

1. 粒徑分布：

- (1) 將砂石倒入篩網內。
- (2) 拍打篩網，將小於該篩網粒徑的砂石篩入下層容器中。
- (3) 再分別計算上下兩層的重量，即可算出粒徑重量百分比。



圖七、測量粒徑過程



圖八、篩網

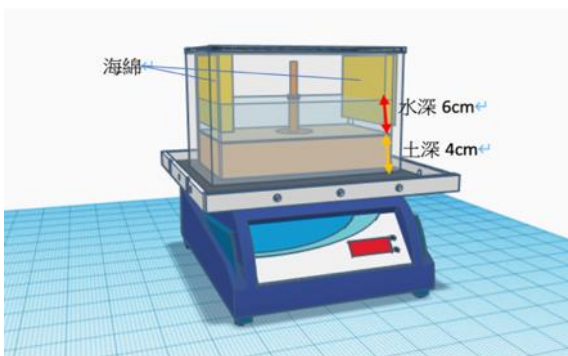
2. 砂石孔隙率及密度：

- (1) 以電子秤得出砂石重量。
- (2) 將砂石裝入量筒中，量出砂石總體積(含砂石間隙體積)  $V_1$ 。
- (3) 倒入固定體積的水  $V_2$ ，使砂石間的空隙被水填滿，測量其總體積  $V_3$ 。
- (4) 然後  $V_1 + V_2 - V_3 = V_4$ ，得出砂石間隙的體積  $V_4$ 。
- (5) 將砂石間隙的體積  $V_4$  除以砂石總體積  $V_1$ ，算出砂石孔隙率。
- (6) 將砂石重量除以砂石體積，得出砂石密度。

表四、砂石分析			
	細砂	麥飯石	活性炭
密度	2.63g/cm <sup>3</sup>	2.25g/cm <sup>3</sup>	1.53g/cm <sup>3</sup>
孔隙率	40.6%	45%	60%
粒徑分布	0.25~0.5mm 65% <0.25mm 35%	>2mm 31% 0.5~2mm 69%	<2mm 25% 2~4mm 75%

(三) 場地模擬：

1. 在透明觀察箱兩側黏上海綿，以減少水流破壞性干涉的影響
2. 以熱熔膠密封觀察箱蓋子，以防漏水影響實驗。
3. 在透明水族箱中加入四公分高的細砂，再加入水至十公分處，製造出水深六公分的實驗情境。
4. 在裝置中央插入單樁式風機模型。



圖九、實驗裝置模擬圖



圖十、實驗裝置圖

四、 實驗一：探討不同振動頻率(RPM)對於單樁式水下基礎穩固度之影響

(一) 實驗設計(變因)：

1. 控制變因：水深、風機水下基礎種類、土深、砂石種類。
2. 操縱變因：振動頻率(RPM)的大小。
3. 應變變因：單樁式風機模型的穩固度。

(二) 實驗步驟：

1. 在透明水族箱中加入四公分高的細砂，再加入水製造出水深六公分的實驗情境。
2. 在透明水族箱中央插入單樁式的水下基礎模型。



圖十一、單樁式風機模型



3. 我們實驗範圍為 50~150RPM，每 5RPM 為一間距，每組實驗進行五次，共 21 組，並取每組中傾斜角度最大的

4. 以積木組成的機構，架設手機拍攝實驗過程。  
(如圖十三)

5. 觀察影片，擷取傾斜幅度最大的五張照片



，匯入軟體 Drawboard PDF，進行角度的量測，

圖十二、數據運算流程圖

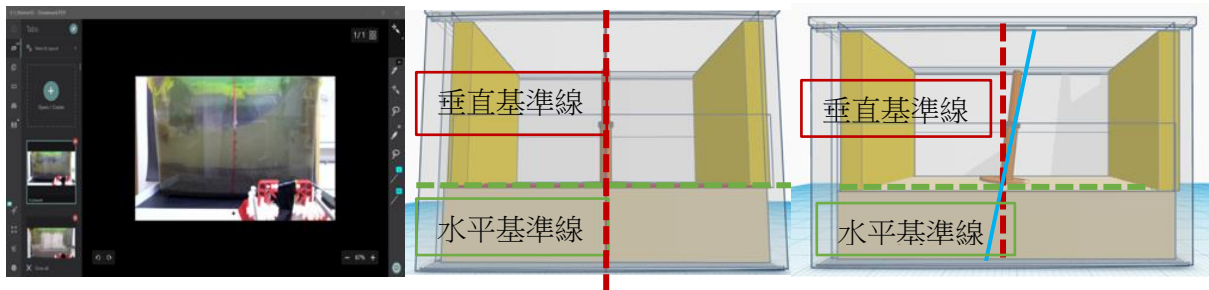
(1) 將照片匯入軟體 Drawboard PDF，運用矩形繪製模式繪出平行線與垂直線。

(2) 將風機模型中間點與平行線與垂直線交會點連線，繪出測量線。

(3) 以角度測量器對準垂直基準線及測量線，算出傾斜角度。



6. 將每次實驗的五個數值算出實驗平均，再計算出五個實驗的總平均。



圖十四、實驗(1)~(3)流程图

## 五、 實驗二：探討不同水深對於單樁式水下基礎穩固度之影響

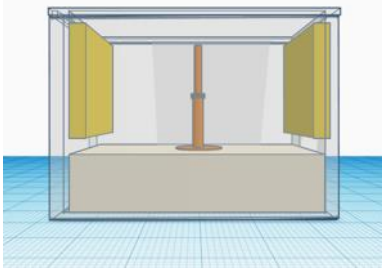
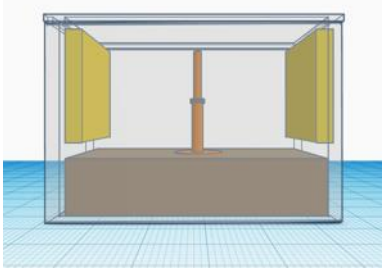
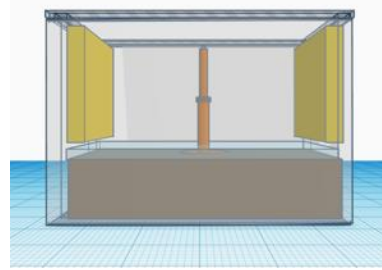
(一) 實驗設計(變因)：

1. 控制變因：振動頻率(RPM)、砂石種類、風機水下基礎種類、土深。
2. 操縱變因：水深。
3. 應變變因：單樁式風機模型的穩固度。

(二) 實驗步驟：

1. 在透明水族箱中加入四公分高的細砂，再加入水製造出水深六公分的實驗情境。
2. 使用水平式地震模擬器在 150RPM 的情況下搖晃一分鐘。
3. 改變砂石含水量在無水、水深 0~6 公分的條件下，重複步驟 1、2。

- 觀察影片，以實驗一敘述的方式測量並計算平均值。

表五、不同砂石含水量示意圖		
無水	水深 0cm(濕潤)	水深 1cm
		

#### 六、 實驗三-1：探討不同砂石組成比例對於單樁式水下基礎穩固度之影響

##### (一) 實驗設計(變因)：

- 控制變因：振動頻率(RPM)、水下基礎種類、土深。
- 操縱變因：砂石組成比例。
- 應變變因：單樁式風機模型的穩固度。

##### (二) 實驗步驟：

- 在透明水族箱中加入四公分高的砂石，中央插入單樁式風機模型，再加入水製造出水深六公分的實驗情境。
- 使用水平式地震模擬器在 150RPM 的狀況下搖晃一分鐘，並以積木組成的機構，架設手機拍攝整個實驗過程。
- 改變砂石比例：(麥飯石:細砂)全麥飯石、9:1、8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8、1:9、全細砂，並重複步驟 1、2。
- 觀察影片，以實驗一敘述的方式測量並計算平均值及標準差。

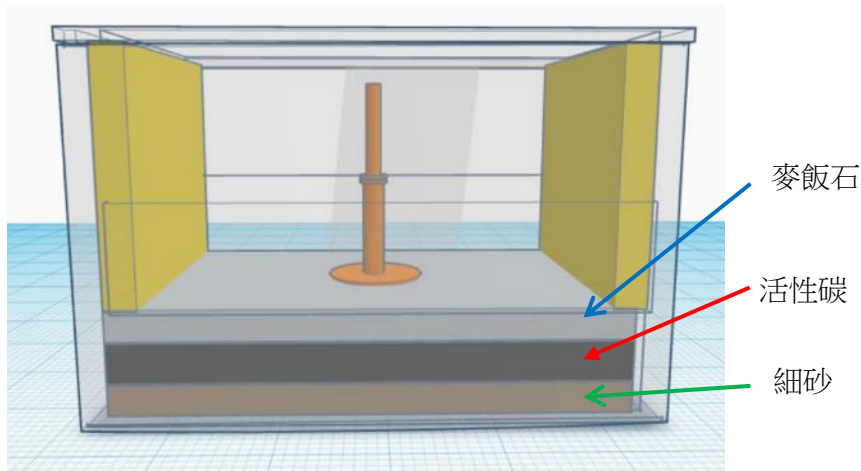
#### 七、 實驗三-2：探討單樁式風機在不同砂石分層對於水下基礎穩固度之影響：

##### (一) 實驗設計(變因)：

- 控制變因：振動頻率(RPM)、水下基礎種類、土深。
- 操縱變因：砂石結構分層。
- 應變變因：單樁式風機模型的穩固度。

(二) 實驗步驟：

1. 在透明水族箱中加入不同分層的砂石至四公分處，中央插入單樁式風機模型，再加入水，製造出水深六公分的實驗情境。



圖十五、砂石分層示意圖

2. 使用水平式地震模擬器在 150RPM 的狀況下搖晃一分鐘，並以積木組成的手機支架，架設手機拍攝整個實驗過程。
3. 改變砂石結構分層(細/碳/麥、細/麥/碳、麥/細/碳、麥/碳/細、碳/細/麥、碳/麥/細)(上述細/碳/麥分別為細砂、活性炭、麥飯石)，重複步驟 1、2。
4. 觀察影片，以實驗一敘述的方式測量並計算平均值及標準差。


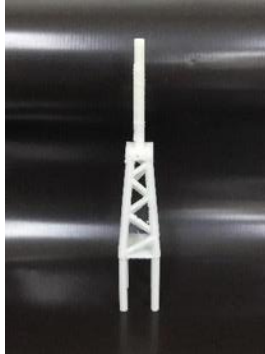


八、 實驗四-1：探討不同現有風機水下基礎結構對於水下基礎穩固度之影響

(一) 實驗設計(變因)：

1. 控制變因：振動頻率(RPM)、水深、土深、砂石種類。
2. 操縱變因：風機水下基礎結構種類。
3. 應變變因：四種模型的穩固度。

(二) 實驗步驟:

1. 在透明水族箱中加入四公分高的砂石，中央插入風機模型，再加入水製造出水深六公分的實驗情境。
2. 使用水平式地震模擬器分別在 120、125、130、135、140、145、150RPM 搖晃一分鐘，並以手機拍攝實驗過程。
3. 更換風機結構(單樁式、套管式、扭轉套管式、三腳式)，並重複步驟 1、2。
4. 觀察影片，以實驗一敘述的方式測量並計算平均值及標準差。

表六、不同種類的風機水下基礎及其模擬圖			
單樁式	套管式	扭轉套管式	三腳式
			

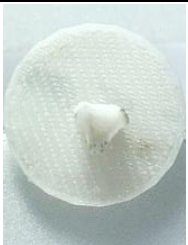
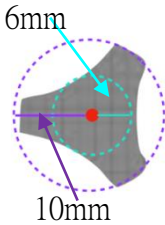
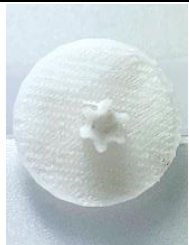
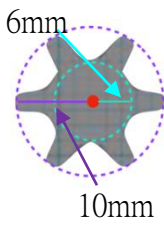

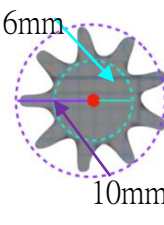
九、實驗四-2：探討單樁式風機模型在優化下對水下基礎穩固度之影響

(一) 實驗設計(變因)：

1. 控制變因：振動頻率(RPM)、砂石種類、土深。
2. 操縱變因：水下基礎結構。
3. 應變變因：三種風機模型的穩固度。

(二) 實驗步驟：

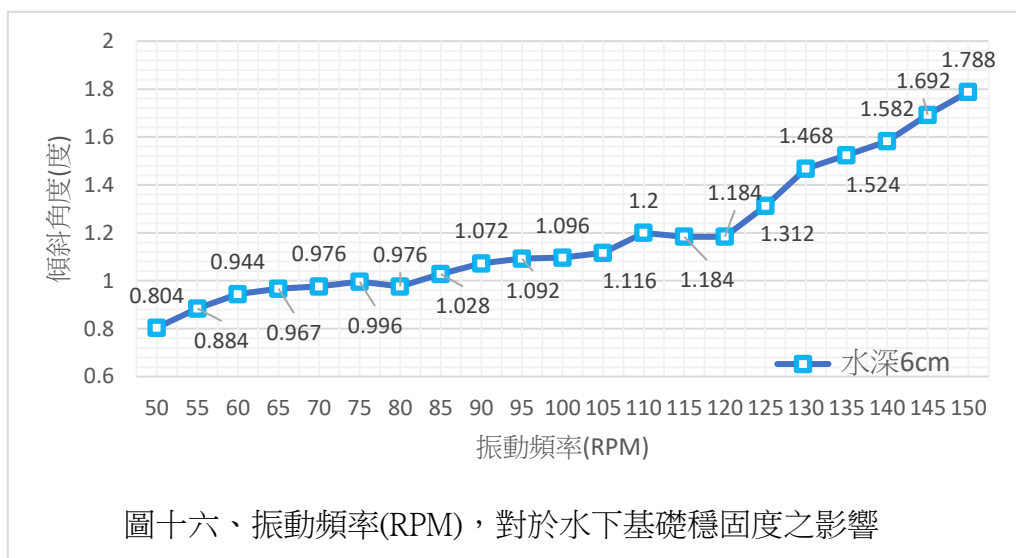
1. 在透明水族箱中加入四公分高的砂石，中央插入風機模型，再加入水製造出水深六公分的實驗情境。
2. 使用水平式地震模擬器在 120、125、130、135、140、145、150RPM 的情況下，搖晃一分鐘，並以積木組成的手機支架，架設手機拍攝整個實驗過程。
3. 改變水下基礎結構(螺紋式、三角式、六角式、九角式)，重複步驟 1、2。
4. 觀察影片，以實驗一敘述的方式測量並計算平均值及標準差。

表七、單樁式優化的水下結構之下視圖					
三角式		六角式		九角式	
					

## 伍、 研究結果

### 一、實驗一：探討不同震度對於單樁式水下基礎穩固度之影響

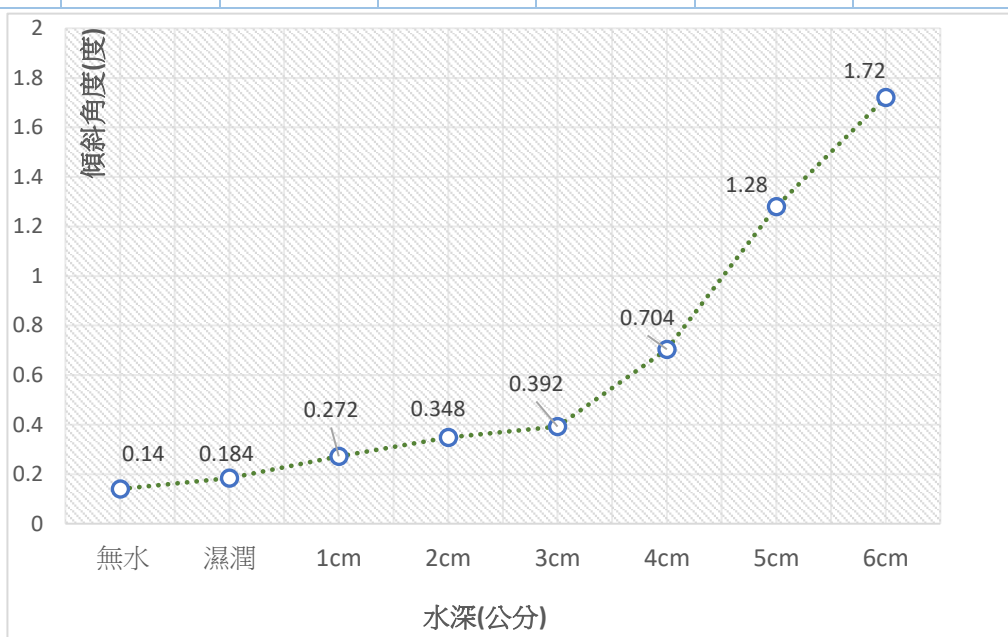
表八、單樁式在 50 ~ 150 RPM 下的傾斜角度							
實驗	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	總平均	標準差
照片編號 RPM	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
50	0.96	0.82	0.80	0.82	0.82	0.804	0.065
55	0.86	0.86	0.88	0.90	0.92	0.884	0.026
60	0.92	0.96	0.96	0.94	0.94	0.944	0.017
65	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	0.967	0.011
70	1.00	0.98	0.98	0.90	1.02	0.976	0.046
75	1.00	1.02	0.96	0.96	1.04	0.996	0.036
80	0.94	0.98	0.98	0.98	1.00	0.976	0.022
85	1.04	1.02	1.00	1.06	1.02	1.028	0.023
90	1.10	1.04	1.08	1.06	1.08	1.072	0.023
95	1.02	1.1	1.16	1.06	1.12	1.092	0.054
100	1.10	1.08	1.10	1.06	1.14	1.096	0.030
105	1.14	1.12	1.14	1.08	1.10	1.116	0.026
110	1.24	1.16	1.22	1.20	1.18	1.200	0.032
115	1.24	1.16	1.24	1.22	1.06	1.184	0.077
120	1.16	1.18	1.26	1.20	1.12	1.184	0.052
125	1.32	1.26	1.30	1.32	1.36	1.312	0.036
130	1.42	1.40	1.54	1.50	1.48	1.468	0.058
135	1.54	1.60	1.44	1.50	1.54	1.524	0.059
140	1.56	1.56	1.58	1.56	1.65	1.582	0.039
145	1.60	1.74	1.70	1.74	1.68	1.692	0.058
150	1.76	1.76	1.78	1.80	1.84	1.788	0.033



圖十六、振動頻率(RPM)，對於水下基礎穩固度之影響

二、實驗二：探討不同水深對於單樁式水下基礎穩固度之影響

表九、單樁式風機在不同水深下的傾斜角度							
實驗	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	總平均	標準差
照片編號	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
水深							
無水	0.18	0.16	0.18	0.08	0.10	0.140	0.042
0cm	0.24	0.08	0.16	0.20	0.24	0.184	0.060
1cm	0.22	0.18	0.24	0.34	0.38	0.272	0.075
2cm	0.30	0.28	0.36	0.42	0.38	0.348	0.052
3cm	0.38	0.28	0.46	0.40	0.44	0.392	0.063
4cm	0.54	0.44	0.54	1.38	0.62	0.704	0.343
5cm	1.28	*3.80	1.28	1.34	1.22	1.280	1.009
6cm	1.78	1.68	1.70	1.80	1.64	1.720	0.061



圖十七、不同水深的傾斜角度



三、 實驗三-1：探討不同砂石組成比例對於單樁式水下基礎穩固度之影響

表十、單樁式風機在不同砂石組成比例下的傾斜角度

實驗	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	總平均	標準差
照片編號 麥飯石:細砂	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
全麥飯石	0.43	0.38	0.50	0.48	0.52	0.462	0.051
9 : 1	0.26	0.30	0.30	0.24	0.30	0.280	0.025
8 : 2	0.50	0.42	0.36	0.40	0.36	0.408	0.052
7 : 3	1.80	1.40	1.68	1.60	1.56	1.608	0.132
6 : 4	0.80	0.82	0.76	0.60	0.86	0.768	0.090
5 : 5	1.28	1.28	1.30	1.34	1.22	1.284	0.039
4 : 6	1.56	1.42	1.58	1.475	1.42	1.491	0.068
3 : 7	1.08	1.02	0.96	1.08	1.04	1.036	0.045
2 : 8	1.34	1.36	1.28	1.34	1.22	1.308	0.054
1 : 9	1.58	1.38	1.58	1.40	1.50	1.488	0.085
全細砂	1.76	1.78	1.76	1.80	1.84	1.788	0.030

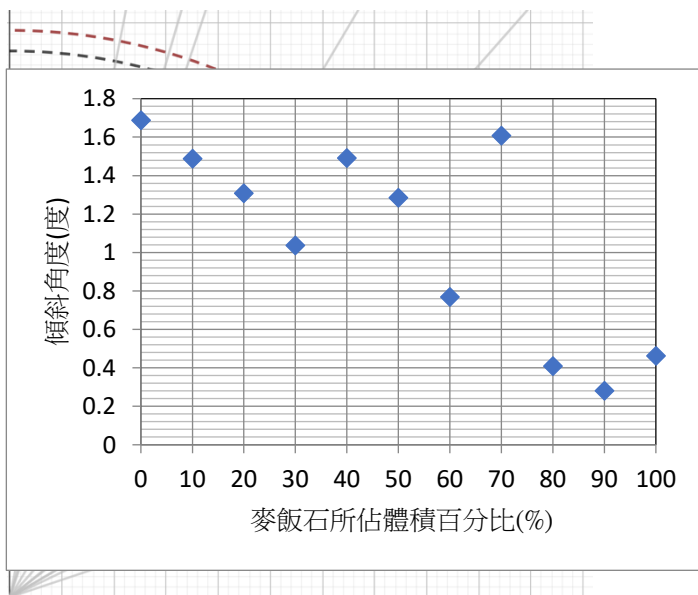
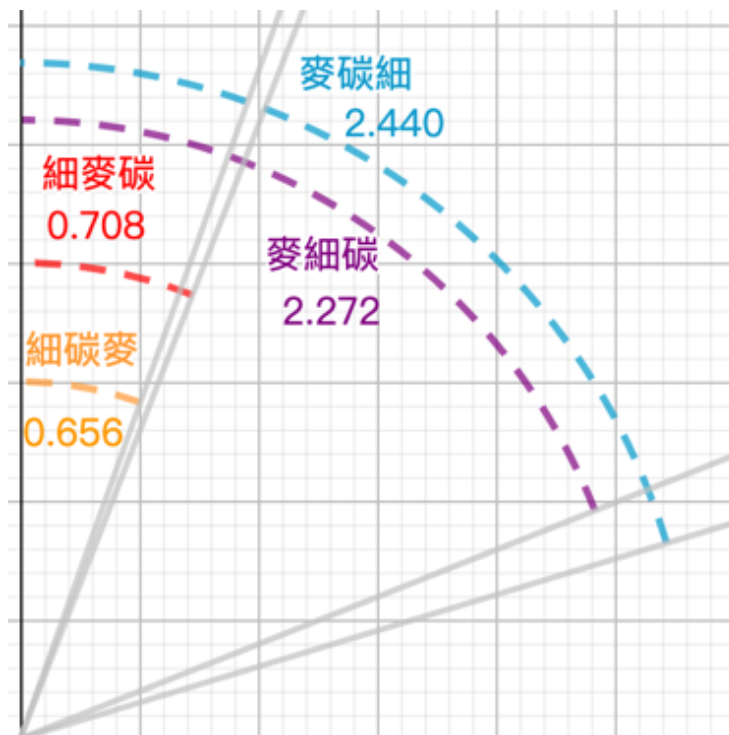


圖 圖十九、單樁式風機在不同麥飯石所佔體積百分比比例下的傾斜角度分布圖

註：由於傾斜角度太小，為了方便觀察，  
上圖中傾斜角度皆放大 50 倍

四、 實驗三-2：探討單樁式風機在不同砂石分層對於水下基礎穩固度之影響：

表十一、砂石分層							
實驗	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	總平均	標準差
照片編號 上/中/下	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
細/碳/麥	0.68	0.76	0.62	0.60	0.62	0.656	0.059
細/麥/碳	0.70	0.72	0.76	0.62	0.74	0.708	0.048
麥/細/碳	2.4	2.36	2.40	2.06	2.14	2.272	0.143
麥/碳/細	2.76	2.18	2.46	2.32	2.48	2.440	0.193
碳/細/麥	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	
碳/麥/細	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	



圖二十、不同砂石分層角度示意圖

註：由於傾斜角度太小，為了方便觀察，上圖中傾斜角度皆放大 30 倍

五、 實驗四-1：探討不同風機水下基礎結構對於水下基礎穩固度之影響：

表十二、單樁式在 120~150RPM 下的傾斜角度

實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號 RPM	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
120	1.16	1.18	1.26	1.20	1.12	1.184	0.075
125	1.32	1.26	1.30	1.32	1.36	1.312	0.080
130	1.42	1.40	1.54	1.50	1.48	1.468	0.232
135	1.54	1.60	1.44	1.50	1.54	1.524	0.150
140	1.56	1.56	1.58	1.56	1.65	1.582	0.194
145	1.60	1.74	1.70	1.74	1.68	1.692	0.160
150	1.76	1.78	1.76	1.80	1.84	1.788	0.233

表十三、套管式在 120~150RPM 下的傾斜角度

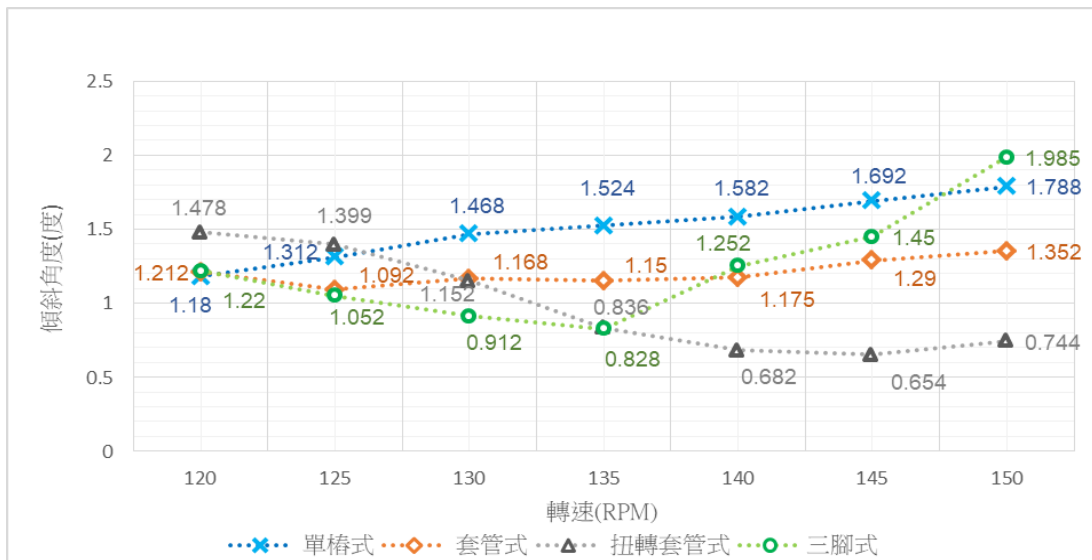
實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號 RPM	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
120	1.14	1.80	1.08	1.00	1.04	1.212	0.071
125	1.10	1.10	1.10	1.14	1.02	1.092	0.039
130	1.14	1.12	1.18	1.28	1.20	1.168	0.060
135	1.16	1.18	1.05	1.22	1.14	1.150	0.057
140	1.22	1.18	1.20	1.08	1.20	1.175	0.052
145	1.30	1.28	1.26	1.28	1.34	1.290	0.028
150	1.28	1.30	1.38	1.42	1.38	1.352	0.053

表十四、扭轉套管式在 120~150RPM 下的傾斜角度

實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號 RPM	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
120	1.78	1.47	1.10	1.60	1.44	1.478	0.224
125	1.18	1.54	1.53	1.45	1.30	1.399	0.139
130	1.24	0.94	1.16	1.32	1.10	1.152	0.129
135	0.74	0.92	0.86	0.80	0.68	0.836	0.063
140	0.82	0.63	0.7	0.63	0.64	0.682	0.074
145	0.58	0.63	0.52	0.74	0.80	0.654	0.103
150	0.66	0.72	0.58	1.00	0.76	0.744	0.142

表十五、三角式在 120~150RPM 下的傾斜角度

實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
RPM							
120	1.26	1.14	1.30	1.18	1.22	1.220	0.057
125	1.04	1.04	1.16	1.06	0.96	1.052	0.064
130	0.80	0.92	1.00	0.86	0.98	0.912	0.074
135	0.74	0.82	0.78	0.92	0.88	0.828	0.065
140	1.14	0.98	1.02	1.04	1.08	1.252	0.055
145	1.52	1.50	0.98	1.73	1.52	1.450	0.252
150	2.08	2.00	1.82	2.04	2.30	1.985	0.396



圖二十一、不同風機水下基礎結構的傾斜角度

六、實驗四-2：單樁改風機模型在不同轉速下對於水下基礎穩固度之影響

表十六、三角式在 120~150RPM 下的傾斜角度

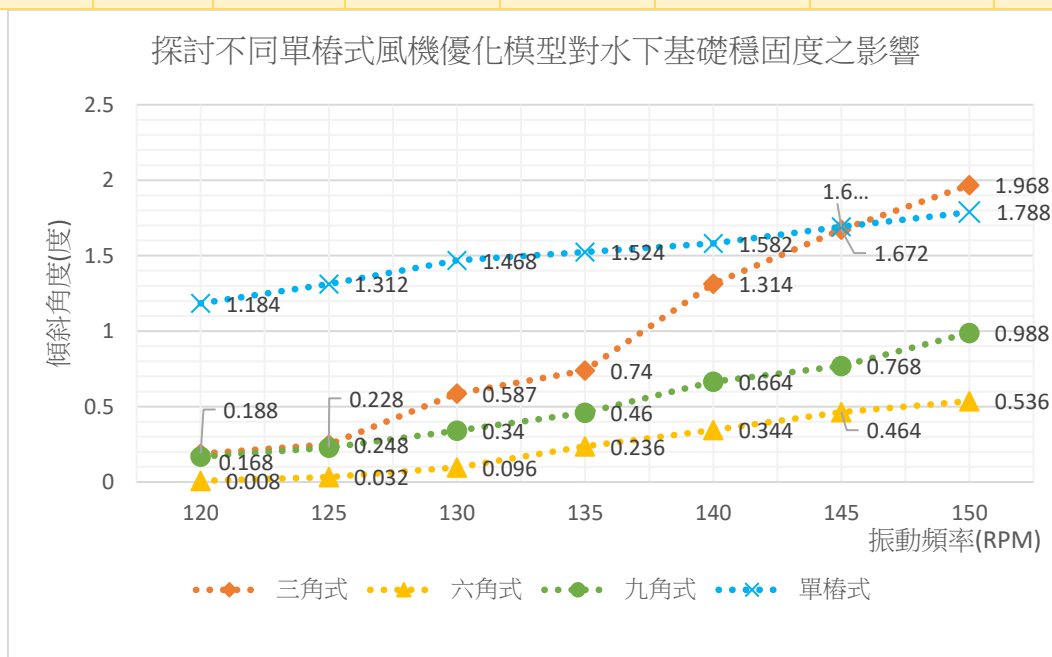
實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
RPM							
120	0.20	0.18	0.18	0.20	0.20	0.188	0.011
125	0.34	0.30	0.28	0.30	0.32	0.248	0.011
130	0.60	0.58	0.56	0.60	0.55	0.587	0.508
135	0.70	0.70	0.76	0.76	0.78	0.740	0.557
140	1.28	1.32	1.30	1.33	1.34	1.314	0.538
145	1.60	1.70	1.66	1.64	1.70	1.672	0.515
150	1.92	2.02	2.00	1.96	1.94	1.968	0.529

表十七、六角式在 120~150RPM 下的傾斜角度

實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
RPM							
120	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.008	0.011
125	0.04	0.02	0.04	0.02	0.04	0.032	0.011
130	0.10	0.10	0.06	0.10	0.12	0.096	0.139
135	0.20	0.22	0.24	0.28	0.24	0.236	0.159
140	0.30	0.32	0.32	0.38	0.40	0.344	0.171
145	0.42	0.46	0.44	0.50	0.50	0.464	0.159
150	0.48	0.54	0.56	0.54	0.46	0.536	0.143

表十八、九角式在 120~150RPM 下的傾斜角度

實驗	1	2	3	4	5	總平均	標準差
照片編號	1~5	6~10	11~15	16~20	21~25		
RPM							
120	0.16	0.18	0.16	0.16	0.18	0.168	0.011
125	0.22	0.24	0.22	0.22	0.24	0.228	0.011
130	0.28	0.40	0.32	0.40	0.30	0.340	0.249
135	0.48	0.42	0.48	0.44	0.48	0.460	0.231
140	0.62	0.70	0.70	0.64	0.66	0.664	0.231
145	0.80	0.76	0.78	0.74	0.76	0.768	0.211
150	1.00	1.02	0.98	0.98	0.96	0.988	0.227



圖二十二、單樁優化與單樁式在不同轉速下對於傾斜角度之影響

## 陸、討論

### 一、前置作業：

#### (一) 風機縮小比例：

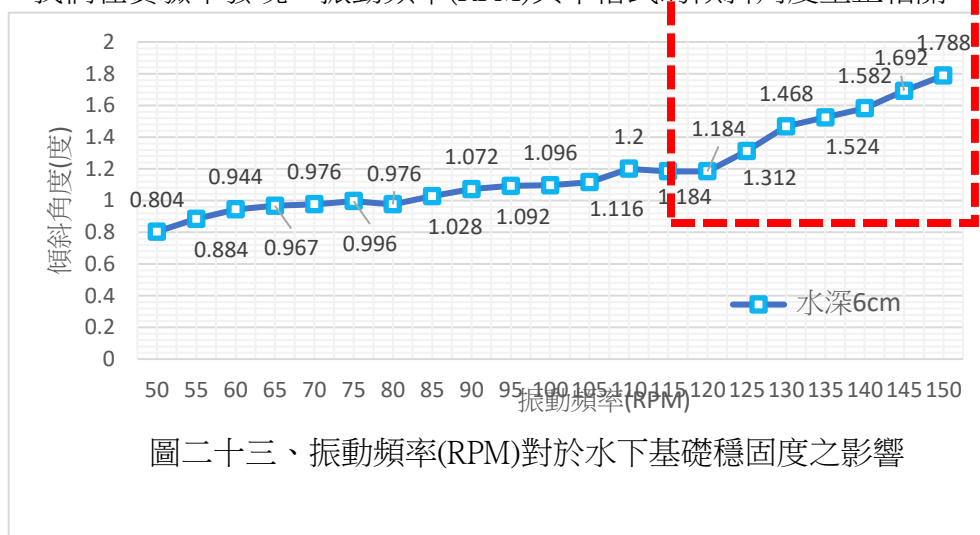
我們使用 3D 列印機來列印水下基礎模型，考量機台限制及水深等其他條件，我們取風機原始高度為 225 公尺，以 1:1500 等比例縮小，製出 15 公分高的模型。

#### (二) 水族箱旁黏貼海綿：

實驗中我們發現當振動頻率(RPM)變大時，水流波動幅度反而降低。我們認為是因為水流撞擊箱壁造成破壞性干涉，因此於水族箱兩側黏貼海綿來減少此影響，也較符合開放海域的情形。

### 二、實驗一：探討不同振動頻率(RPM)對於單樁式水下基礎穩固度之影響

我們在實驗中發現，振動頻率(RPM)與單樁式的傾斜角度呈正相關，尤其在 120RPM

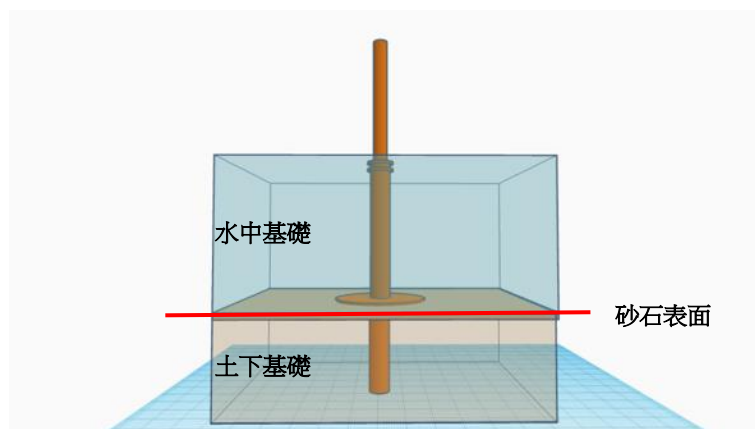


以上，相關性更高也與我們預測相符。

我們初步認定，當實驗裝置隨著水平式地震模擬器運動時，箱內的水可能因為慣性的原因，不會隨著裝置做完全一致的運動，而會產生相對於裝置的移動，造成水會更加快速來回衝擊風機，而且若來回振動的水波，彼此間造成建設性干涉時，將有極大的波浪產生來衝擊風機，而影響到風機穩固度。

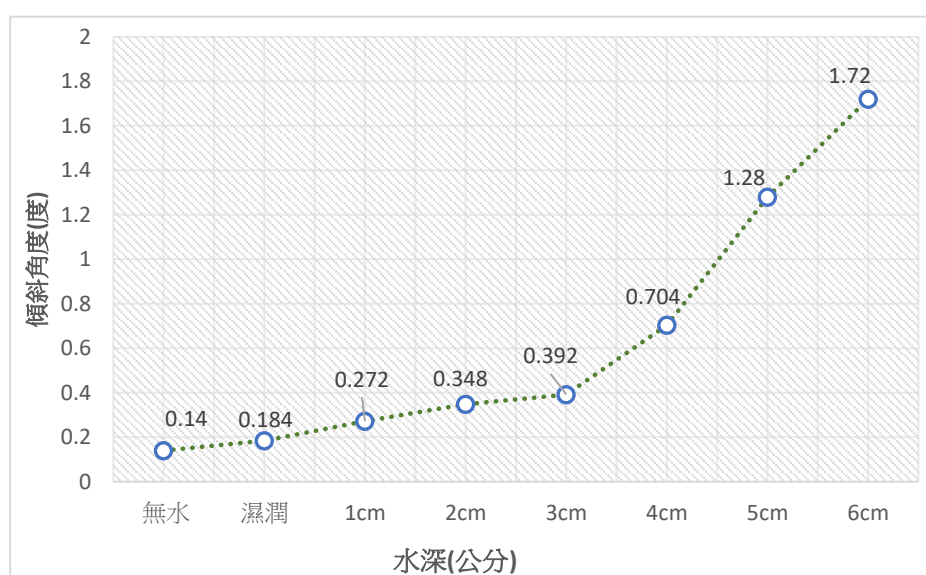
我們又進一步推測，當風機模型受到的側向水流推力大於砂石強度時，風機便會更容易傾斜，因為水流推力和水波間的建設性干涉效果，會隨著振動頻率(RPM)的上升增大，才造成此實驗結果。而當轉速大於 120RPM 時，傾斜角度有比較明顯的變化(如上圖紅框處)，因此在後續的實驗我們設定在 120~150RPM(震度 4 級~5 弱)的範圍來進行。





圖二十四、水下基礎名稱示意圖

### 三、實驗二：探討不同水深對於單樁式水下基礎穩固度之影響



圖二十五、不同水深的傾斜角度

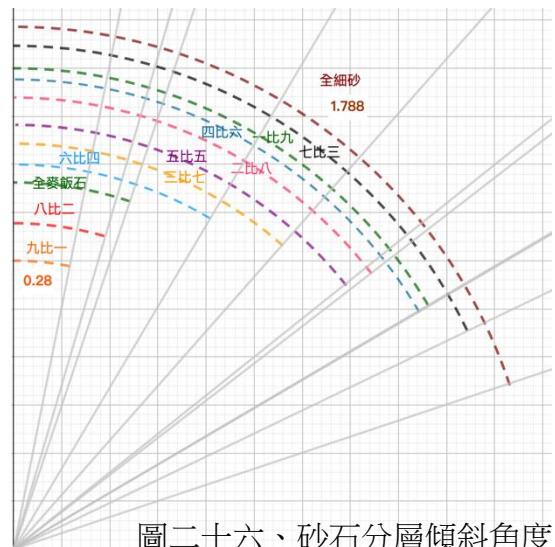
我們發現水深和單樁式傾斜角度呈正相關，我們認為當水深增加時，水流推力會增大，而風機的受力面積也會增加，在兩個因素的影響下呈現了此結果。而在水深超過 3 公分時，也就是水深大於沉積物深度時，傾斜角度開始有大幅的變化。我們將風機傾斜的過程視為一以風機中心為支點的槓桿運動，由於單樁式的水中基礎的表面積在此實驗中是隨著水深固定增加的，因此我們認為 3 到 4 公分的變化，是因隨著水深增加的力矩所造成的。

#### 四、實驗三-1：探討不同砂石組成比例對於單樁式水下基礎穩固度之影響

我們發現風機的傾斜角度和細砂的含量比例大致呈正相關。全細砂的風機傾斜角度為最大值 1.788 度。原先預測穩固度最佳的全麥飯石，大致如同我們的猜測，其風機傾斜角度很小(0.462 度)，但其穩固度稍差於以下二種比例：混合砂石(麥飯石：細沙)8:2 的傾斜角度 0.408 度以及 9:1 時的最小值 0.28 度。

對以上兩種的數據呈現，我們做出以下分析，分析一：推測單顆重量較輕的細砂，容易被水流擾動或帶起，導致穩固度不佳，且我們認為

在裝置搖晃的過程會發生土壤液化，而在砂石排列改變時，溢出的水分也會導致風機傾斜，所以在地層結構為全細砂時，風機穩固性會最差。分析二：在(麥飯石：細砂)9:1 或 8:2 時，少部分的細砂可以填補麥飯石之間的孔隙，降低孔隙率，減緩土壤液化的影響，而讓此二種砂石比例的穩固度，會比全麥飯石來得佳。

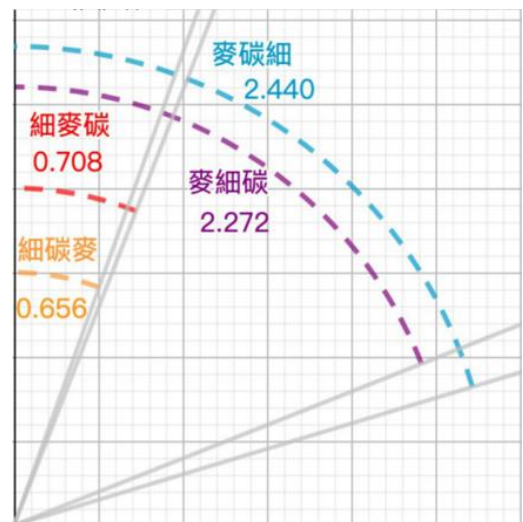


圖二十六、砂石分層傾斜角度 (圖中角度皆放大 50 倍)

#### 五、實驗三-2: 探討單不同砂石分層對於單樁式水下基礎穩固度之影響

當我們以三種砂石分層來探究時，我們發現只要是細砂放置在最上層時，穩固度是最佳。若將活性碳放置於最上層時，最下層不管是細砂或麥飯石，穩固度皆最差，最後還造成風機會完全傾倒(如圖三十)。

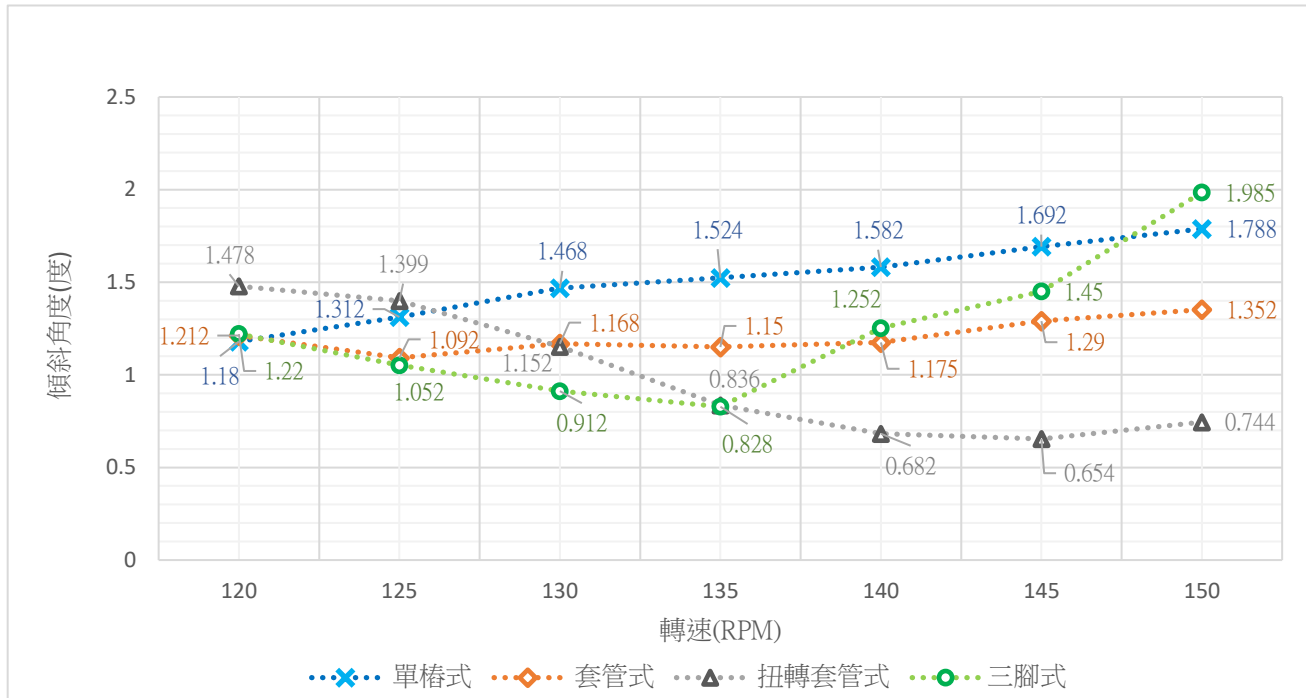
對以上的數據呈現，我們做出以下分析，在文獻中看到發生土壤液化的現象，約發生在地表至地表下 30 公尺處，我們將其換算為實驗中的砂石深度約是 2 公分，約是最上層至中層的一半處，而且得知孔隙率越高的地質結構，越容易受到土壤液化的影響。



圖二十七、砂石分層傾斜角度 (圖中角度皆放大 30 倍)

經由測量我們計算出三種砂石的孔隙率大小次序為活性碳>麥飯石>細砂。我們認為在強震時會發生土壤液化的現象，導致孔隙間的水溢出，造成風機傾斜，也因此孔隙率越高的砂石，所受到的影響越嚴重，溢出的水越多，才導致此結果。

## 六、實驗四-1：探討不同風機水下基礎結構對於水下基礎穩固度之影響

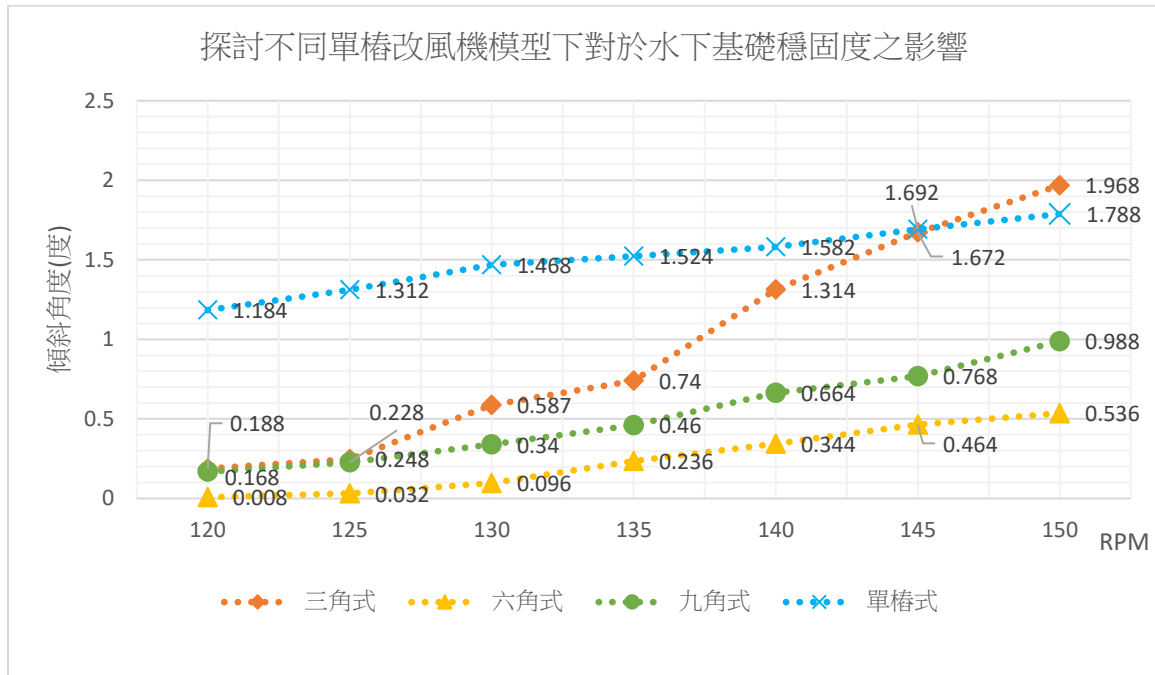


圖二十八、現有風機結構對於穩固度的影響

我們發現套管式和單樁式的傾斜角度皆和振動頻率(RPM)呈正相關，三腳式的傾斜角度會逐漸下降，至 135RPM 時開始上升，而扭轉套管式的傾斜角度會隨著振動頻率(RPM)逐漸下降，且在 150RPM 時，穩固度為扭轉套管式>套管式>單樁式>三腳式。

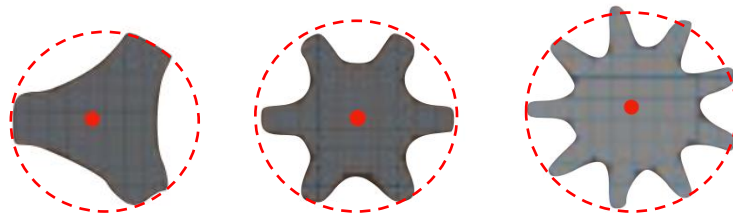
我們分析其受力情形，推測扭轉套管式外側三支基樁可使砂石包覆中央基樁，讓其較為穩固，所以扭轉套管式的最大靜摩擦力也是其中最大的，當震度上升時，其靜摩擦力也隨之上升，和水流推力抵銷後，才呈現傾斜角度隨震度增加而下降的結果。而單樁式和套管式，則是因為在震度四級(120RPM)時就超過了最大靜摩擦力，動摩擦力和逐漸增加的水流推力抵銷後，才呈現出傾斜角度隨震度上升的結果。由圖二十八我們也猜測，三腳式約在震度四級(135RPM)時超過最大靜摩擦力，傾斜角度才會從震度四級(135RPM)時開始大幅上升。

七、實驗四-2：探討單樁式風機模型優化下對於水下基礎穩固度之影響



圖二十九、單樁變形與單樁式在不同轉速下對於傾斜角度之影響

在實驗中，我們以單樁式為原型，嘗試改變水下基礎的構造來提升穩固度，我們發現在 150RPM 時穩固度是六角式>九角式>單樁式>三角式。我們認為單樁式、六角式及九角式的表面積皆大於三角式，導致三角式的穩固度是最差的。



我們分析剖面形狀，  
圖三十、風機剖面示意圖  
發現六角式及九角式砂石坎入的體積皆相同，但九角式坎入的砂石較破碎，導致砂石所供給的強度較小，穩固度較差。

## 八、振動頻率(RPM)與地震震度的關聯

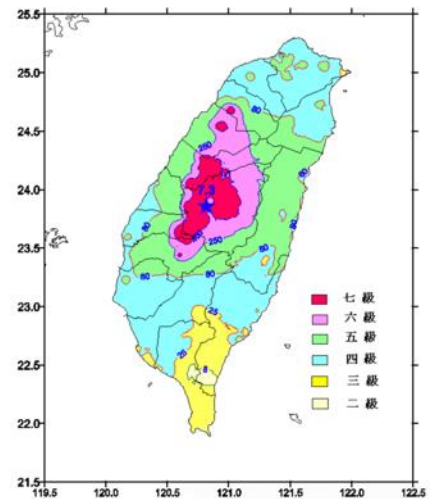
### (一) 震度換算

為了找出將水平式來回震盪器在不同 RPM 時對水族箱產生的震動與地震震度之間的關聯，我們利用簡諧運動的原理找出震盪器在不同 RPM 時產生的加速度及速度，並對應出相對的地震震度。本實驗使用的水平式來回震盪器來回震盪距離為 2cm，故半徑 r 取 1cm 進行計算，結果如下表：

表十九、不同 RPM 時對應的地震震度						
r(cm)	轉速(RPM)	$\omega = \frac{RPM \times 2\pi}{60}$	$v = r\omega$	$a = r\omega^2$	新制震度	舊制震度
1	5	0.5	0.5	0.3	0	0
1	10	1.0	1.0	1.1	1	1
1	15	1.6	1.6	2.5	1	1
1	20	2.1	2.1	4.4	2	2
1	25	2.6	2.6	6.9	2	2
1	30	3.1	3.1	9.9	3	3
1	35	3.7	3.7	13.4	3	3
1	40	4.2	4.2	17.5	3	3
1	45	4.7	4.7	22.2	3	3
1	50	5.2	5.2	27.4	4	4
1	55	5.8	5.8	33.2	4	4
1	60	6.3	6.3	39.5	4	4
1	65	6.8	6.8	46.3	4	4
1	70	7.3	7.3	53.7	4	4
1	75	7.9	7.9	61.7	4	4
1	80	8.4	8.4	70.2	4	4
1	85	8.9	8.9	79.2	4	4
1	90	9.4	9.4	88.8	4	5
1	95	9.9	9.9	99.0	4	5
1	100	10.5	10.5	109.7	4	5
1	105	11.0	11.0	120.9	4	5
1	110	11.5	11.5	132.7	4	5
1	115	12.0	12.0	145.0	4	5
1	120	12.6	12.6	157.9	4	5
1	125	13.1	13.1	171.3	4	5
1	130	13.6	13.6	185.3	4	5
1	135	14.1	14.1	199.9	4	5
1	140	14.7	14.7	214.9	4	5
1	145	15.2	15.2	230.6	5 弱	5
1	150	15.7	15.7	246.7	5 弱	5

(二) 本實驗震度大小與 921 地震的關聯：

1999 年的 921 地震是臺灣百年來規模最大的地震，規模達到 7.3，其震央位置位於南投集集，所以對臺灣中部地區造成極大的災情。而本實驗所使用的方法可以模擬到舊制震度 5 級的情況，與 921 地震在臺灣中部沿海地區的震度相同。因而我們認為模擬範圍已足夠模擬當地地震情況。

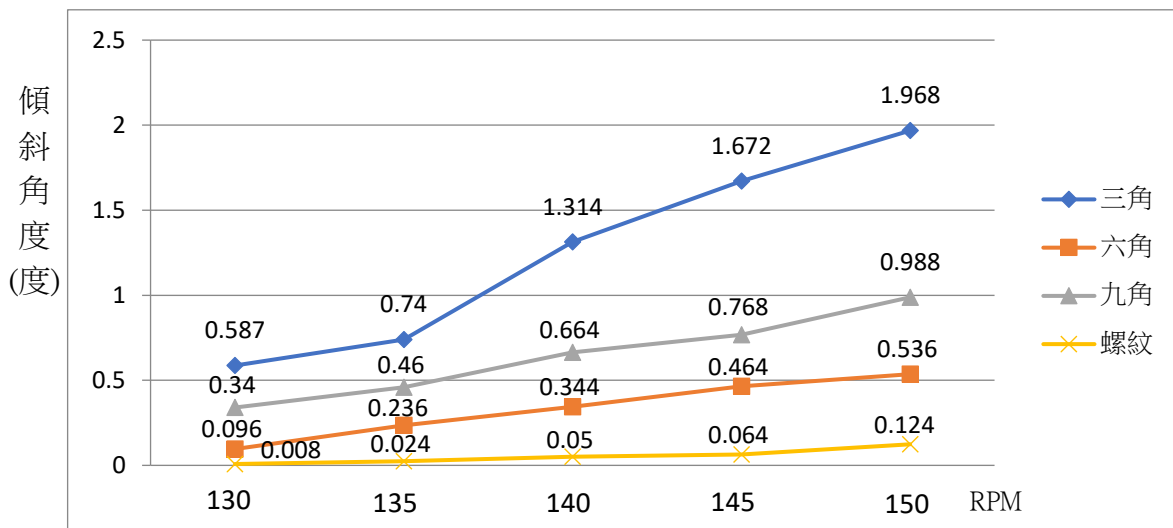


圖三十一、921 大地震等震圖

引用自參考文獻資料一

九、 未來展望：

由於離岸風機在近年來有越做越高的趨勢，因此對於水下基礎的穩固度的要求也越來越高，目前朝兩個方式進行更改：水下基礎的深度及寬度。目前我們我們加粗了單樁式的半徑，並改變其形狀，製造出了螺紋式(如圖三十三)。



圖三十二、單樁(變形)傾斜角度折線

由圖三十二可以看到，跟實驗二-2 的另外三式相比，螺紋式的穩固度有明顯的增加，未來有機會，我們希望能對這塊進行更進一步的研究。



圖三十三、螺紋式模型



## 柒、結論

本研究探究離岸風機水下基礎與地層結構，透過實驗模擬及數據分析，我們發現風機模型的傾斜角度，受到以下幾種因素影響：

### 一、實驗一：探討不同振動頻率(RPM)對於單樁式水下基礎穩固度之影響

我們發現振動頻率(RPM)和單樁式傾斜角度呈正相關，且在 120~150RPM 時，傾斜角度變化最為劇烈。

### 二、實驗二：不同水深對於單樁式水下基礎穩固度之影響

我們發現水深大致和傾斜角度呈正相關，且在水深為 4 公分開始，也就是當水深大於土深時，傾斜角度開始有明顯的變化，前後約有 1 度的差距，我們認為此時水流推力造成的力矩，開始大幅的超越砂石所供給的阻力。

### 三、實驗三-1：探討不同砂石組成比例對單樁式水下基礎穩固度之影響

我們發現穩固度大致和麥飯石含量呈正相關，且當麥飯石:細砂為 9:1 時，細砂可以適當的填補麥飯石之間的孔隙，讓穩固度達到最佳，傾斜角度約為 0.28 度。

### 四、實驗三-2：探討不同砂石分層對單樁式水下基礎穩固度之影響

我們發現砂石孔隙率越高，越容易到土壤液化的影響，進而影響到風機的穩固度。在實驗中得知，孔隙越小的砂石在最上層，穩固度越佳，也就是當孔隙率最小的細砂，放置在最上層時，較不易受到影響，風機也就會越穩固。

再者，認為強震時土壤液化所溢出的水份，是造成風機傾斜的主要原因之一，也因此設置風機時，必須評估土壤液化的風險及地表至地表下 30 公尺處的砂石孔隙率，在實驗中 60%的孔隙率，如孔隙率最大的活性碳，已會輕易造成風機傾倒。

### 五、實驗四-1：探討不同風機水下基礎結構對於單樁式水下基礎穩固度之影響

我們發現在 150RPM 時穩固度為扭轉套管式>套管式>單樁式>三腳式，而套管式的穩固度是第二高且是變異度最小的，至於扭轉套管式雖在 150RPM是穩固度是最小的，但其在弱震時的穩固度反而不彰，因此不建議使用。

### 六、實驗四-2：探討單樁式風機模型結構變形對水下基礎穩固度之影響

我們發現六角式的穩固度>九角式>單樁式>三角式。經由此實驗我們可以證明在一定的範圍內，增加砂石接觸面積是可以有效增加穩固度的。

綜合以上幾點，我們認為若要在雲彰沙脊北側海域使用單樁式，水深不宜大過基樁土下深度，且相較於目前使用的單樁式，套管式在遇震時，是較為穩固及安全的。而我們認為扭轉套管式只要改善其結構，就可以大大減少其變異度，且土壤液化是不可忽視的因素。

## 捌、參考文獻資料

### 一、中文部分：

- (一) 張欽森、林俶寬、張上君、李信志、劉新達、陳克維(民 106)·離岸風場區塊開發海域環境建構計畫·經濟部能源局研究成果報告(計畫編號：106-D0601)。
- (二) 張欽森、林俶寬、張上君、李信志、劉新達、陳克維(民 107)·離岸風場區塊開發海域環境建構計畫·經濟部能源局研究成果報告(計畫編號：107-D0601)。

### 二、網頁資料：

- (一) 5 年練兵組「台灣隊」：2025 年台灣將成風電王國，還是「下課回家」？(民 108 年 8 月 27 日)·關鍵評論網·取自：  
<https://www.thenewslens.com/feature/offshorewind/121223>
- (二) 大彰化離岸風力發電場(無日期)·維基百科·取自：<https://zh.wikipedia.org/wiki/>
- (三) 大彰化離岸風電計畫(無日期)·沃旭能源·取自：<https://orsted.tw/zh/orsted-in-taiwan/our-projects/greater-changhua>
- (四) 中央氣象局地震等震圖(無日期)·中央氣象局·取自：  
<https://scweb.cwb.gov.tw/special/19990921/921isomap.htm> 921
- (五) 地震的規模與震度(無日期)·國立中央大學應用地質研究所·取自：  
<http://gis.geo.ncu.edu.tw/921/teach/地震的規模與震度首頁.htm>
- (六) 何謂等震度線?(無日期)·921 地震博物館·取自：<http://921.rel.org.tw/edu-earthquake/edu-earthquake29.html>
- (七) 海上巨型風扇的支撐者——水下結構(民 108 年 9 月 4 日)·科技大觀園·取自：  
<https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sT0u.htm>
- (八) 臺灣主要礦物與岩石(無日期)·國立中央大學應用地質研究所·取自：  
<http://gis.geo.ncu.edu.tw/mineral/m63.htm>
- (九) 臺灣再生能源推動聯盟(無日期)·取自：<https://trena5.wixsite.com/website-2/post/>
- (十) 環境資訊中心(無日期)·取自：<https://e-info.org.tw/>
- (十一) 簡諧運動(無日期)·教育部教育雲·取自：  
[http://163.28.10.78/content/vocation/mechanical/tp\\_st/top2/ch10/htm/ch10-1.htm](http://163.28.10.78/content/vocation/mechanical/tp_st/top2/ch10/htm/ch10-1.htm)
- (十二) 離岸風力機的雙腳——水下基礎技術簡述(民 108 年 7 月)·能源資訊平臺·取自：  
<http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=YW5hbHlzaXM=&id=MTc4>
- (十三) 離岸風電知識網(無日期)·取自 <http://www.nepii.tw/KM/OWE/index.html>

## 【評語】 030509

### 【優點】

1. 研究主題與環境綠色能源，災防及生活相關，可提供設置風力發電之考慮因素與方法，具社會應用可能。
2. 科學方法的使用，具成熟的概念。
3. 研究實驗過程完整、設想周全，且施作充分，結論明確。
4. 提出螺紋式支柱具有創新概念。
5. 問題回答切合主題，且有抓住重點。

### 【建議】

1. 將來可考量及討論尺度比例放大到實際狀況的修正。
2. 將來應考慮到風力發電的扇葉轉動以及重心上移的影響。
3. 量度數據的確定性，統計有效數字的呈現，可以再更精準。
4. 螺紋式支柱設想概念很好，值得深入探討實際施工的挑戰。

## 作品簡報

# 探究離岸風機水下基礎之穩固度

~ 以雲彰沙脊北側海域為例 ~

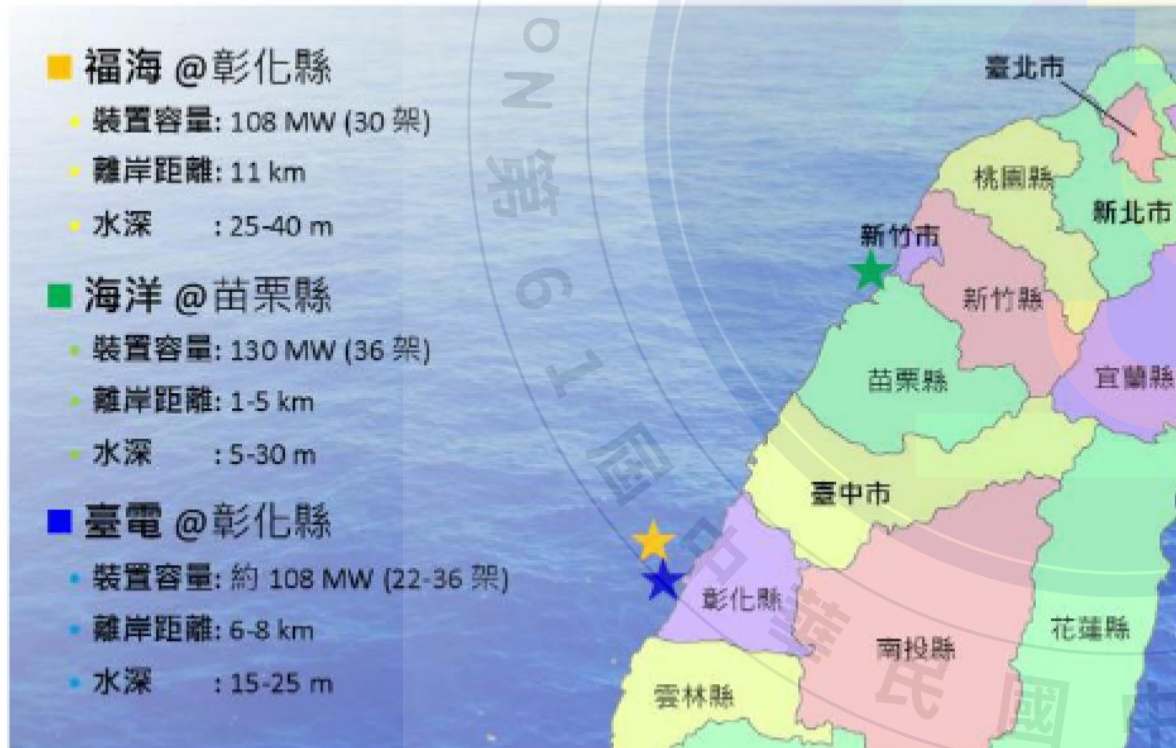
組別：國中組

科別：地球科學

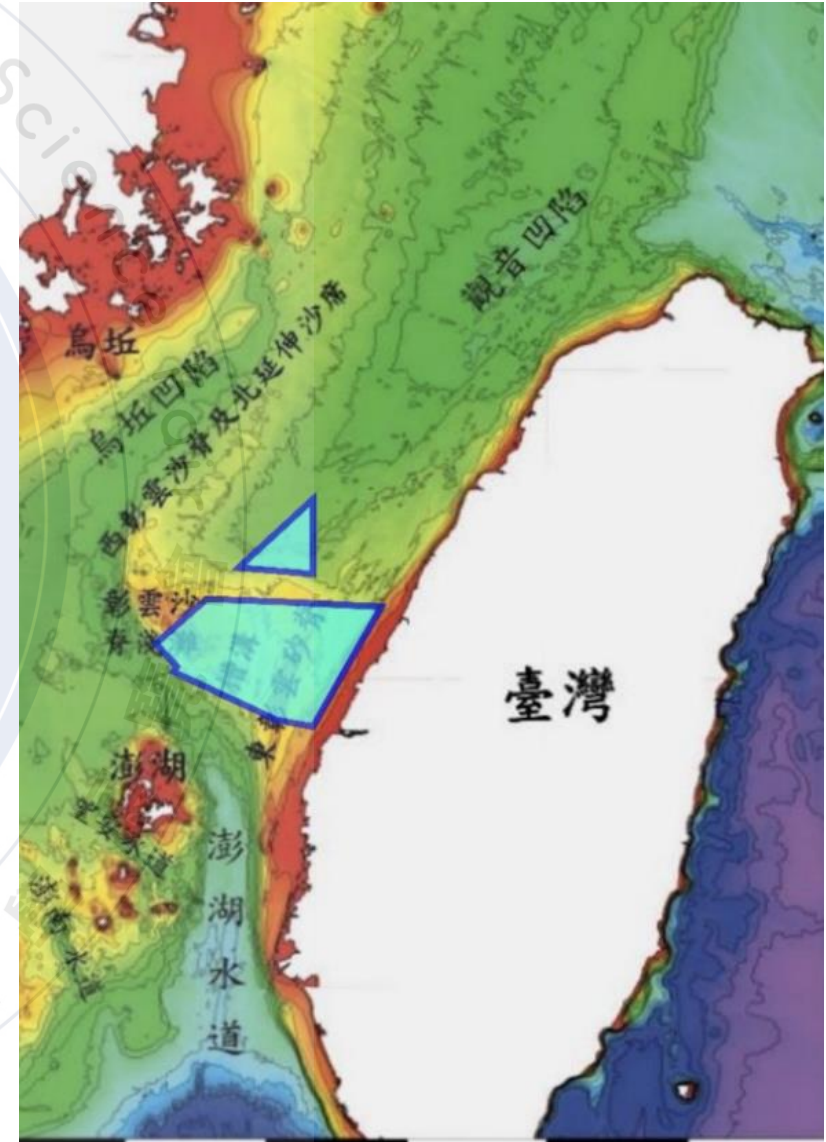


# 緒論

- 評估地震對離岸風機的危害度
- 分析影響離岸風機穩固度的因素
- 優化風機水下基礎構造提升穩固度



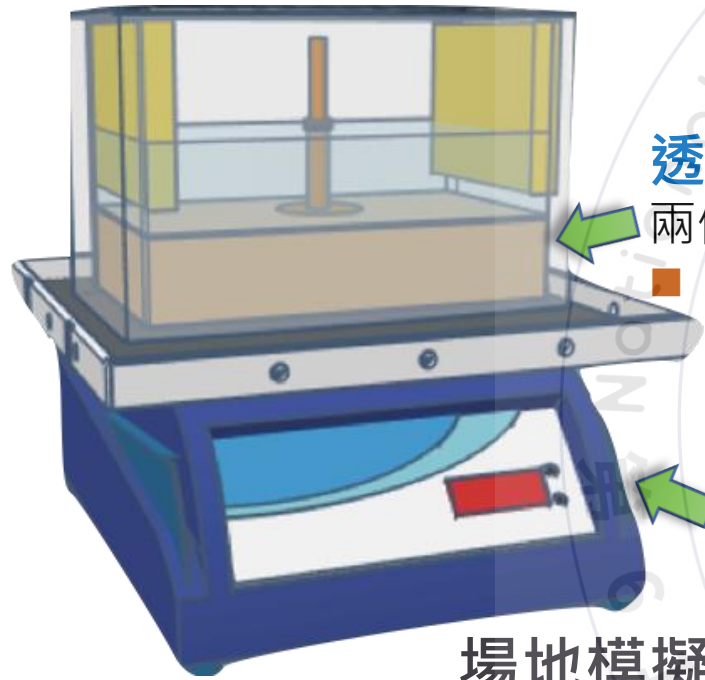
(呂學德等人, 2015)



(張欽森等人, 2018)



# 研究過程與方法



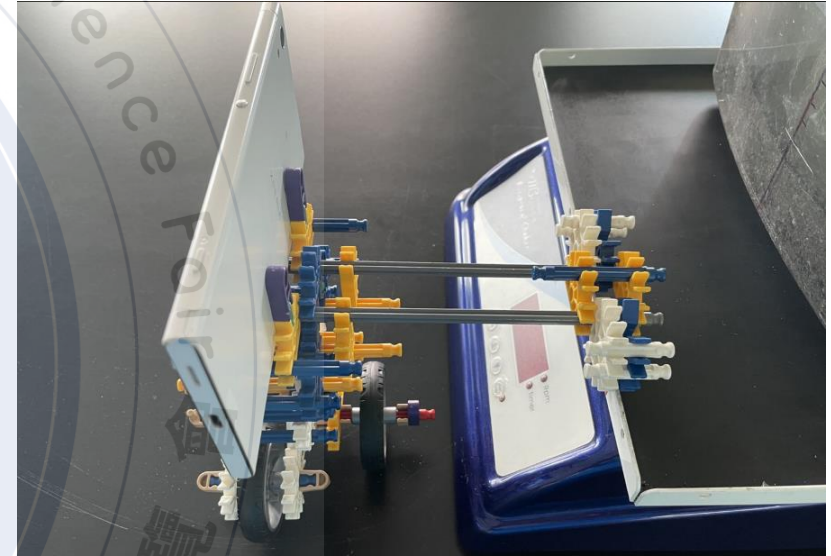
透明觀察箱

兩側貼海綿，中央插入風機模型

■ 比例1:1500

水平式地震模擬器

場地模擬實驗裝置



利用自製的手機架跟拍

數據計算

不同振動  
頻率(RPM)

每組實驗5次  
並錄影

每個影片  
擷取5張圖片

選取25個數據  
計算單次平均

取5次平均  
計算總平均

# 沉積物模擬

	細砂	麥飯石	活性炭
密度	2.63g/cm <sup>3</sup>	2.25g/cm <sup>3</sup>	1.53g/cm <sup>3</sup>
孔隙率	<b>40.6%</b>	<b>45%</b>	<b>60%</b>
粒徑分佈	0.25 ~ 0.5mm 65% <0.25mm 35%	>2mm 31% 0.5~2mm 69%	<2mm 25% 2 ~ 4mm 75%



實驗樣本篩選

# 實驗一 探討振動頻率

RPM 對應 新制震度

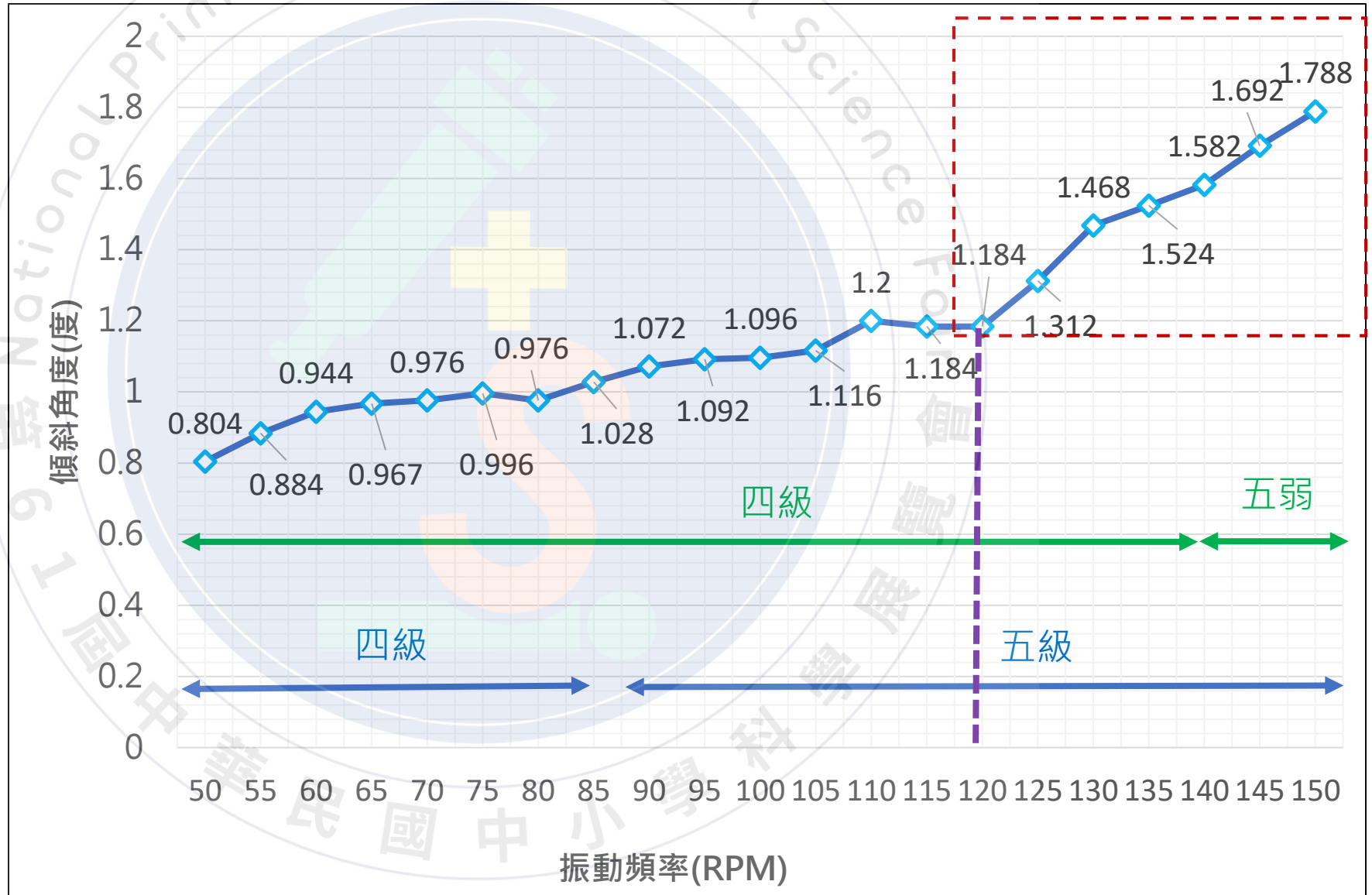
50~140RPM→四級

145~150RPM→五弱

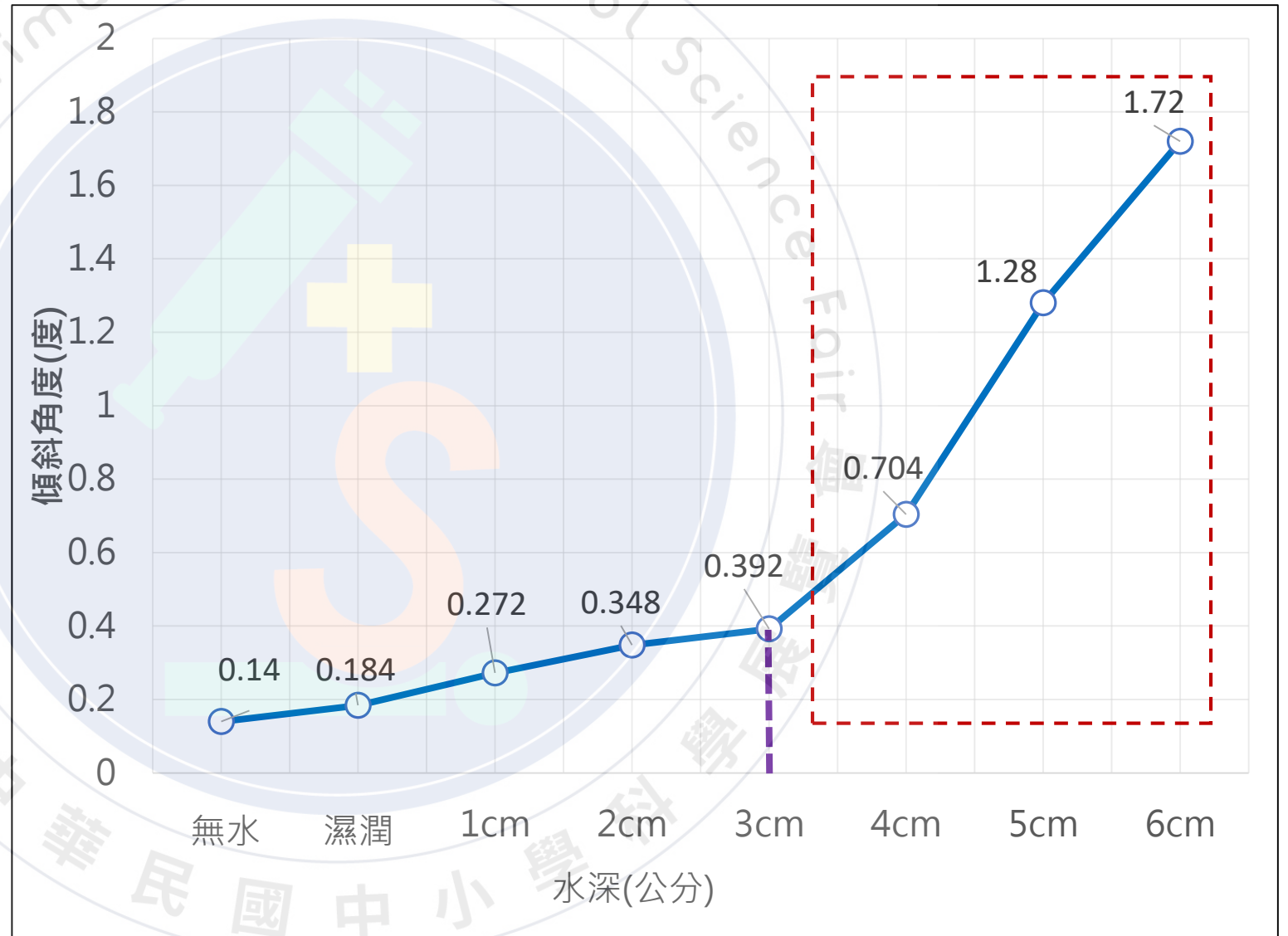
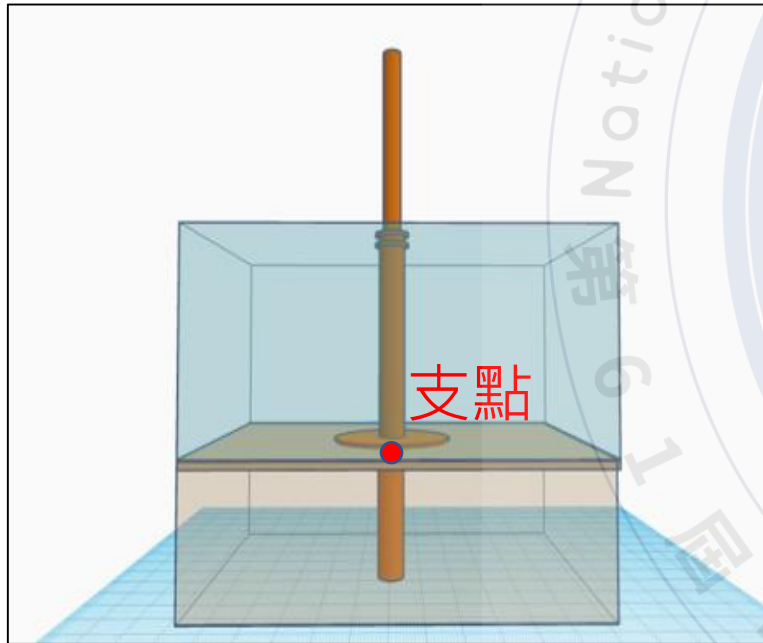
RPM 對應 舊制震度

50~85RPM→四級

90~150RPM→五級



# 實驗二 海水深度的影響





# 實驗三-1 砂石組成分析

樣本混合

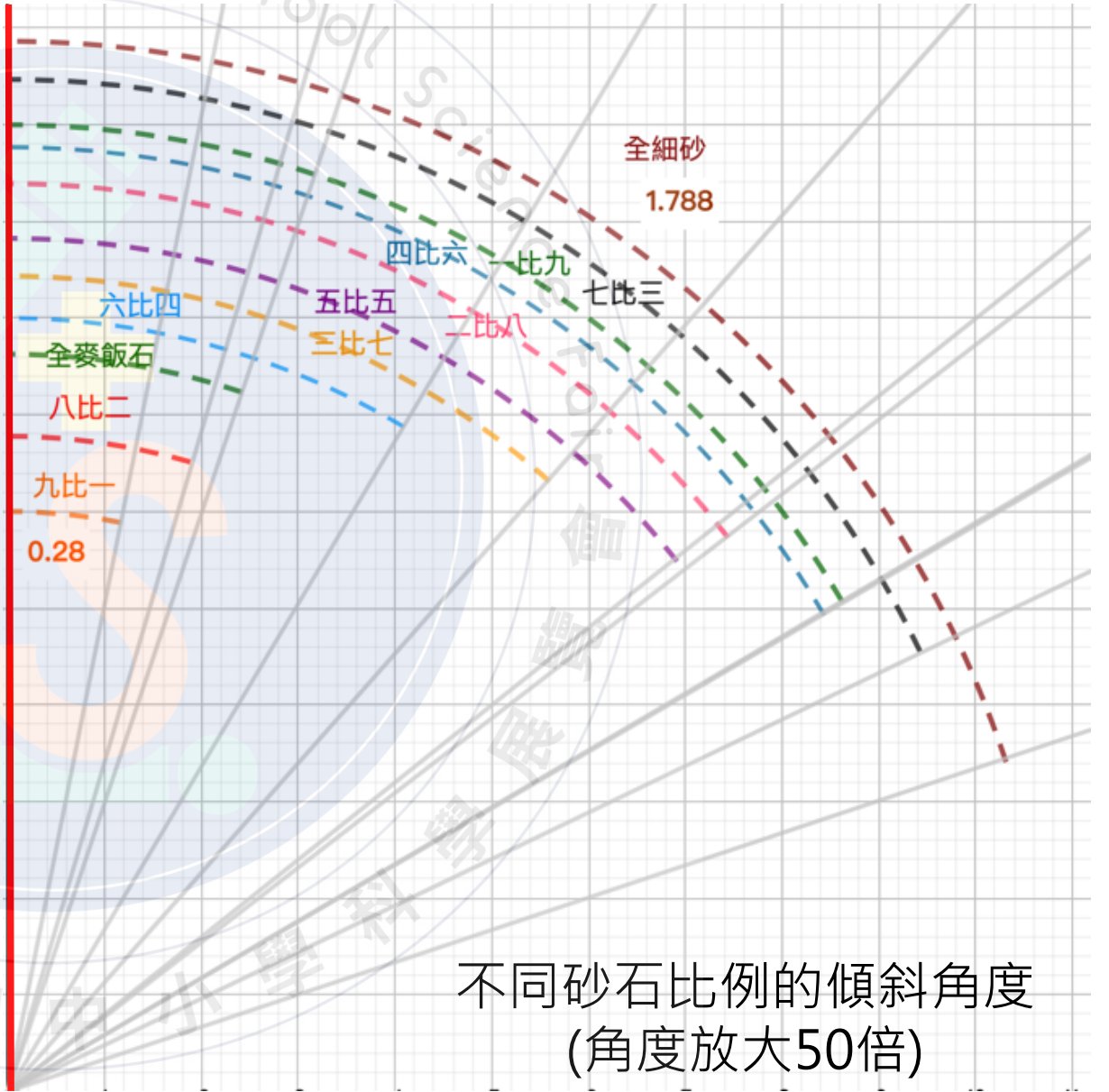


細砂



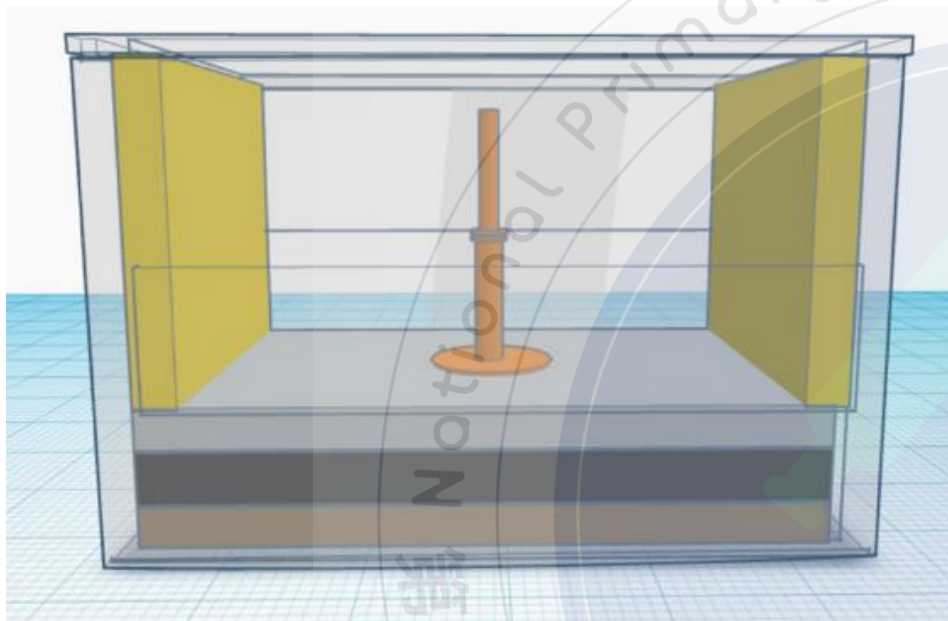
麥飯石

紅線為水下基礎原始位置

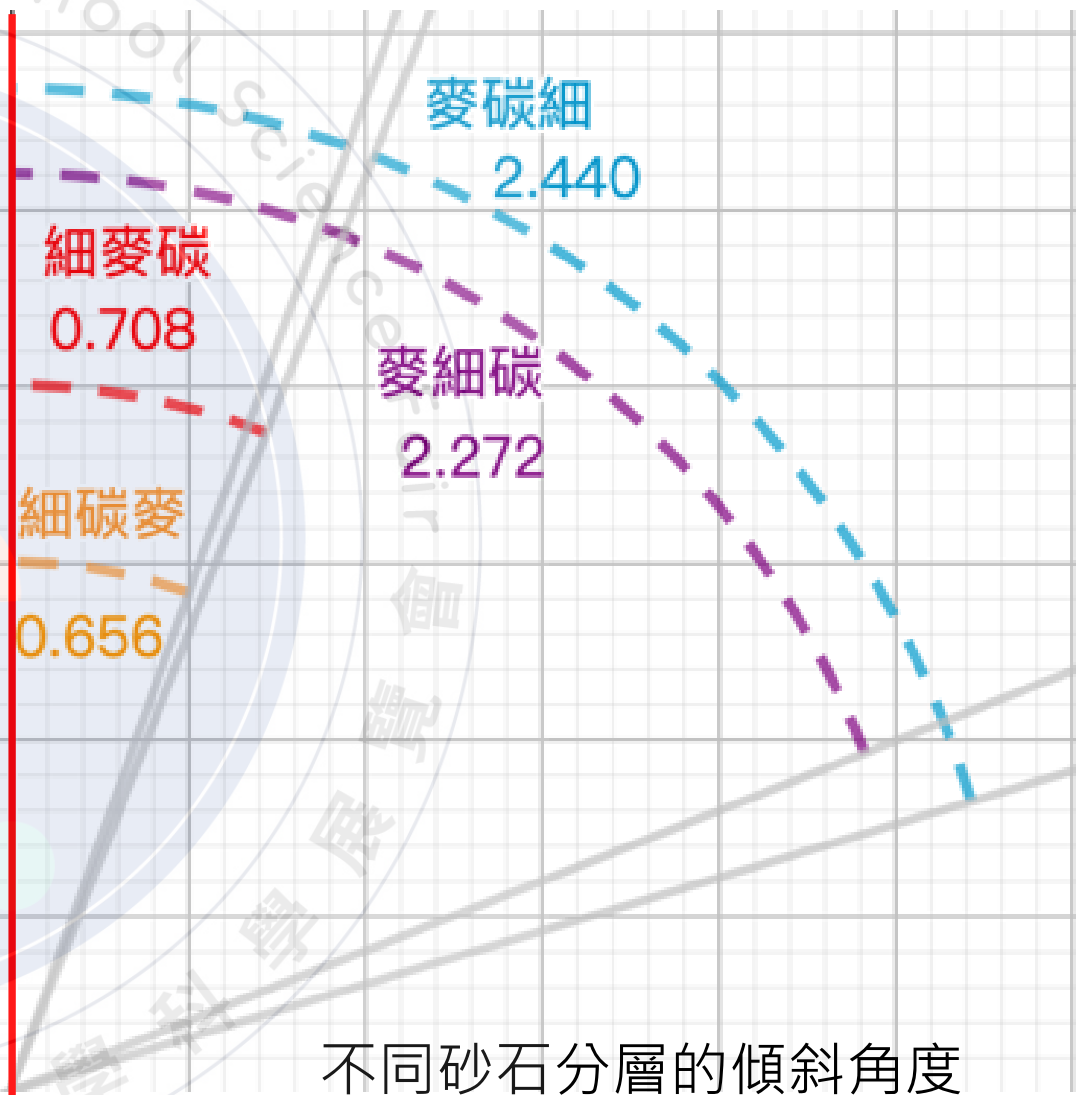


不同砂石比例的傾斜角度  
(角度放大50倍)

# 實驗三-2 改變砂石分層



紅線為水下基礎原始位置



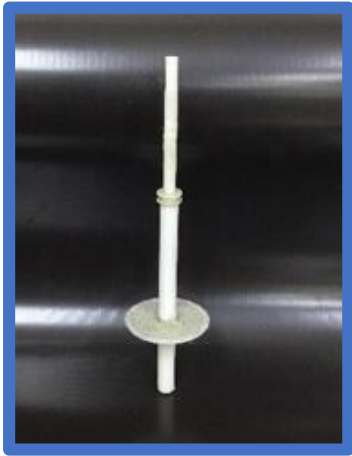
不同砂石分層的傾斜角度  
(角度放大30倍)



活性炭孔隙率60% 麥飯石孔隙率45% 細砂孔隙率40.6%



# 實驗四-1 常用水下基礎比較



單樁式



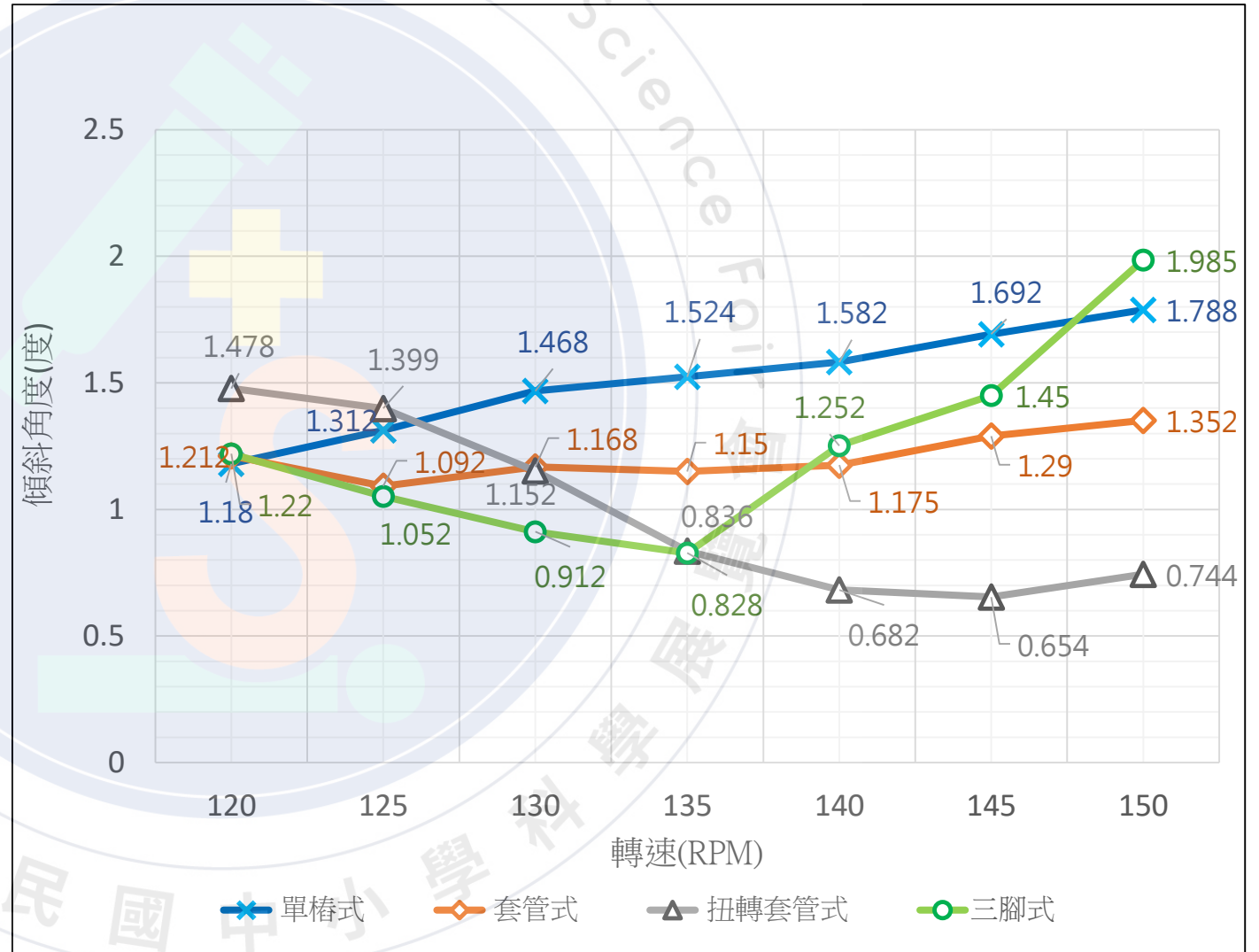
套管式



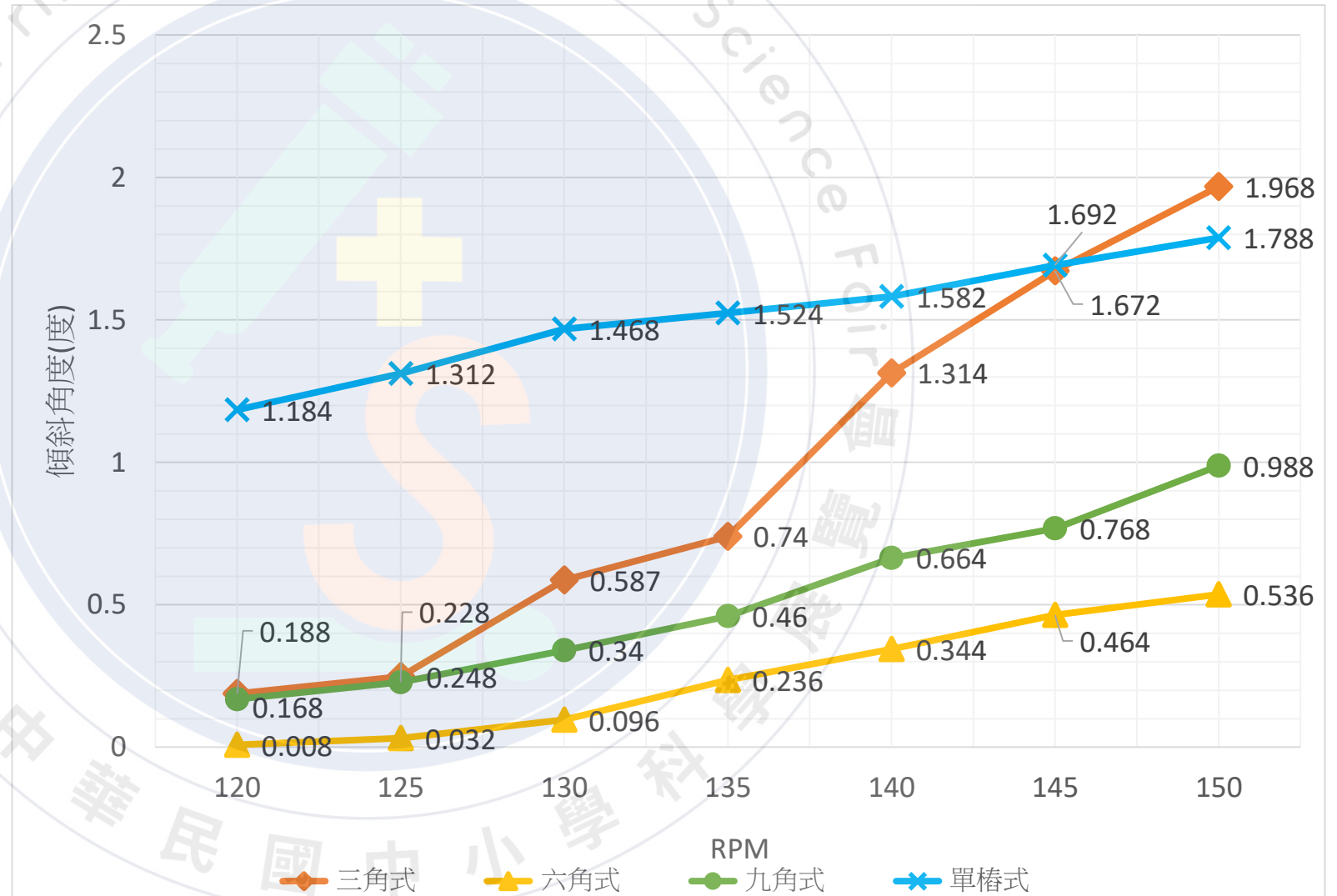
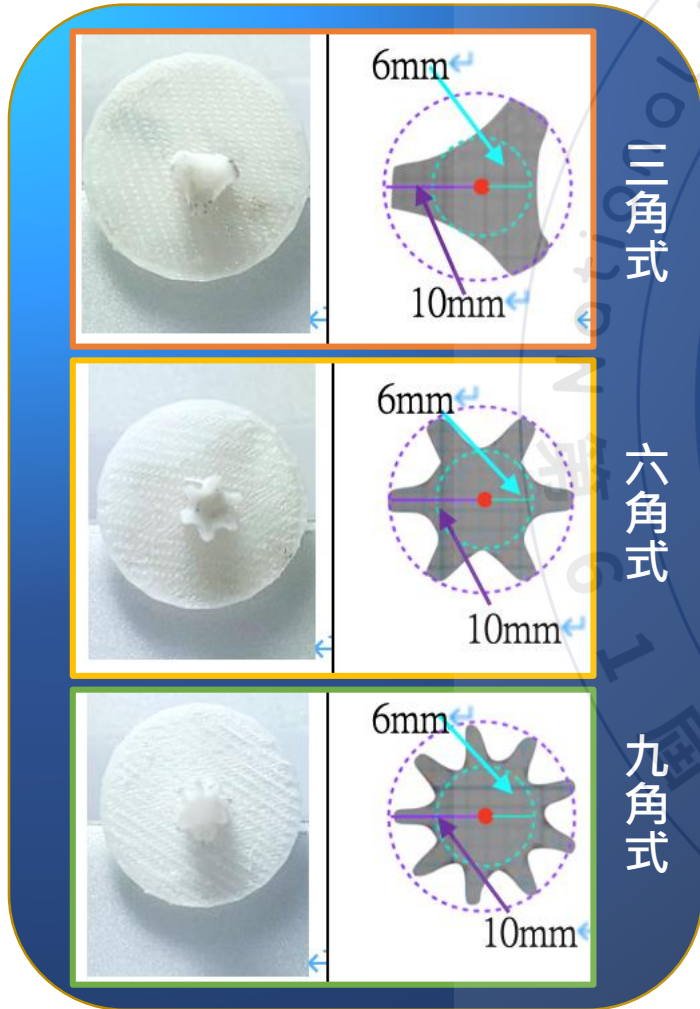
扭轉套管式



三腳式



# 實驗四-2 單樁式基礎優化



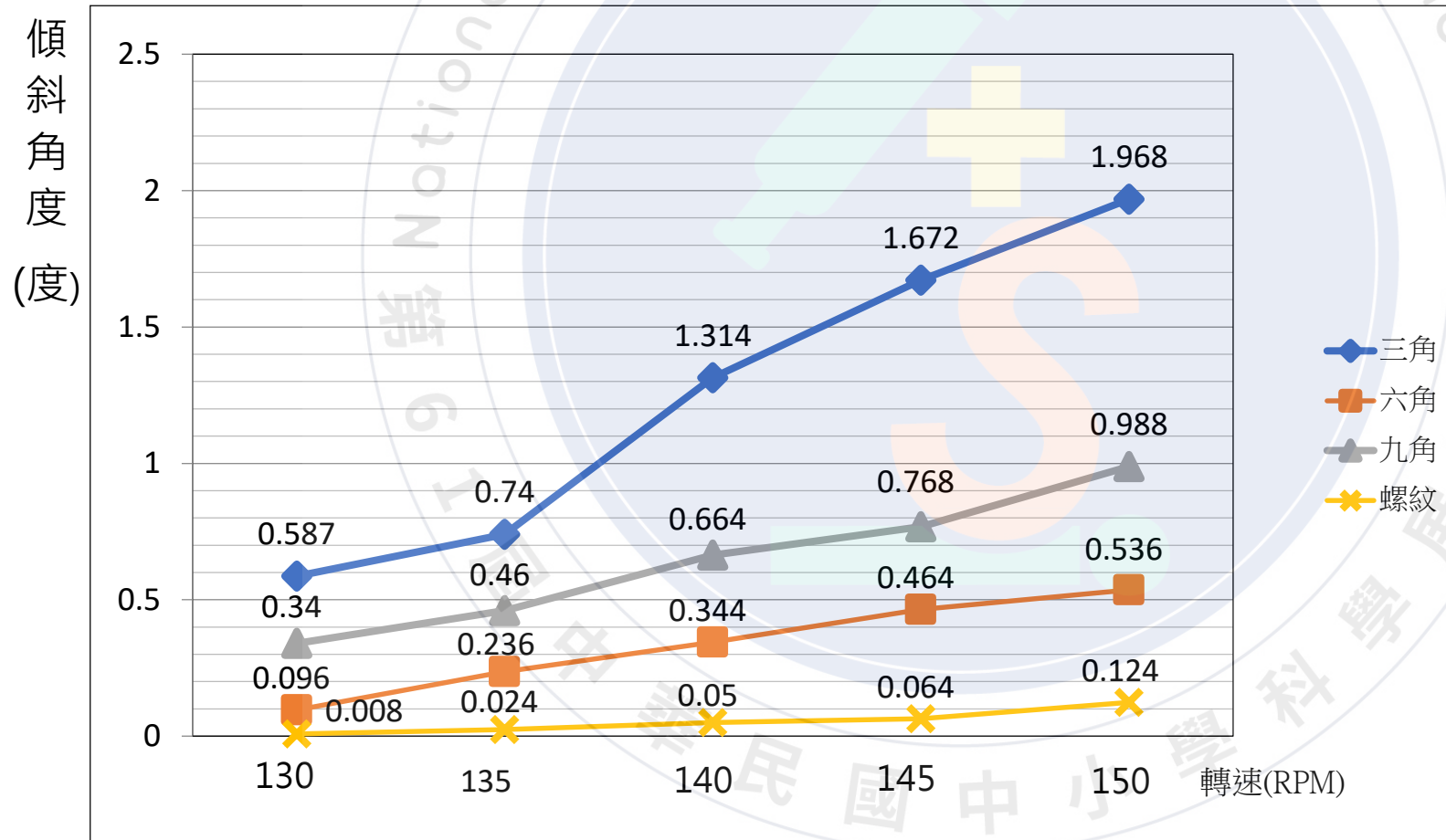
# 結論

選擇雲彰沙脊北側海域建造風機，我們建議如下：

- 採用套管式水下基礎，遭遇地震時風機將較為穩固安全。
- 使用單樁式水下基礎時，基樁地下長度宜大於海水深度。
- 以單樁式為原型，透過改變水下基礎的構造，可以增加接觸砂石的表面積而提高風機的穩固度。
- 選擇地層中含有顆粒大，且密度高的砂石為風機設置地點，風機的基樁穩固度較佳。

# 未來展望

■ 迎接2050淨零碳排，期待研究成果能應用在臺灣的綠能開發上。



螺紋式模型