

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科  
(鄉土)教材獎

051904

驚「掏」駭浪—消波塊與沙灘地形對沙石掏空量  
的影響

學校名稱： 國立臺南第一高級中學

作者：  高二 張鈞碩  高二 林士傑  高二 陳子恩	指導老師：  黃建彰  施怡如
---	-----------------------------

關鍵詞： 消波塊、掏空、侵蝕

## 摘要

本研究使用水槽、自製造浪器，模擬海岸環境，探討消波塊的擺放角度、擺放密度，以及沙灘的水深、坡度、波浪強度(造浪器頻率)，對沿岸沙石侵蝕面積的影響。利用 image j 分析在不同因素下消波塊周圍沙石侵蝕之面積，以及其隨時間的變化。研究結果發現，在不同擺放角度中，消波塊之兩角面向波浪時(本研究定義為 0 度)其下沙石侵蝕面積最大；在擺放密度中，發現擺放越多的消波塊，其侵蝕面積越大；在沙灘水深不同時，當水深越淺時，其侵蝕面積越大；當沙灘之坡度越大時，其侵蝕面積越大；當造浪器之頻率越大時，其侵蝕面積也會增加，而計算體積時，發現在不同擺放角度下，掏空的體積與侵蝕面積成正相關。

## 壹、前言

### 一、研究動機：

沙岸上消波塊的設置是為了抵擋波浪侵蝕海岸線，但經過資料查詢，發現消波塊下方的沙灘會產生被掏空的現象，可能使其失去保護海岸線的功能，反而會助長海岸線的侵蝕，新聞亦曾報導有關於消波塊附近可能易產生離岸流的現象，並且會加劇侵蝕海岸地形，使得消波塊附近產生肉眼不易察覺的低窪地區，提升遊客受傷的風險，甚至發生不少遊客溺斃的事件。

消波塊對於沙灘的保護或是危害在不同條件下可能產生不同的效果，甚是複雜，沒有一定的結論，因此本研究想要探究消波塊下沙灘侵蝕量與波浪的關係，找出影響消波塊下沙灘被掏空的可能因素，我們希望可以建立模型，來了解消波塊附近可能產生的危險帶。

### 二、研究目的：

有鑑於過去的研究主要都是實際海岸的個案研究，實際海岸中的因素頗多且交互影響，難以人為控制變因進行實驗，因此本研究將使用水槽實驗進行模擬消波塊、沙灘與波浪的交互作用並試圖找出以下關係：

- (一)觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布。
- (二)觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布。
- (三)探討造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係。
- (四)探討海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係。
- (五)探討海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係。
- (六)探討消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係。

(七)探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係。

(八) 探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕體積之關係。

### 三、文獻回顧：

沙灘坡度較緩，沙灘較為寬廣，海岸較為穩定，所受侵蝕後退較不顯著（許民陽，2002），但林雪美(2011)的論文顯示在新北頂寮沙灘放置消波塊後，沙灘坡度變陡，可能導致沙灘變得不太穩定，更容易受到波浪侵蝕。消波塊本身也可能因為下方的沙灘被掏空而移位，無法有效地防止沙灘的侵蝕，無法達到當初防止沙灘侵蝕的目的。

#### (一)消波塊：

##### 1、外形與結構：

常見的外形有點類似正四面體，是由中心點往四個方向伸展，分別對應正四面體的頂點，亦有其他形狀，像是八腳錐體、三角形、圓形和球狀。

##### 2、抵抗能力：

當其錯亂擺放時，能有效降低波浪的衝擊，其原理是兩個腳間形成剖半的弧形，再加上柱體間隱約有著使波浪流經之通道，可藉此吸收波浪之衝擊能量，而當波浪通過此隱形流道時，同時會對消波塊形成向下的作用力，使消波塊更不易被沖走。

##### 3、堆放方式：

消波塊會因地理位置和功能而有不同的堆疊方式，理論上若將消波塊放在防波堤效果較佳，而放於沙灘則成效不彰。消波塊的形狀和向外突出的三個腳會環環緊扣，若隨機擺放會使其更不易位置錯移。

#### (二)波浪：

##### 1、種類：

(1)深水波 :水深大於波長的二分之一時，稱為深水波。

(2)淺水波:水深小於波長的二十分之一時，稱為淺水波。

(3)表面張力波：當波長較短時，波浪受到表面張力影響較大，其波峰成圓形及波谷成 V 型。

(4)重力波：當波長較長時，重力效應影響較大。

(5)碎浪：當波高與波長的比值大於  $1/7$  時，會形成碎浪。

##### 2、波速：

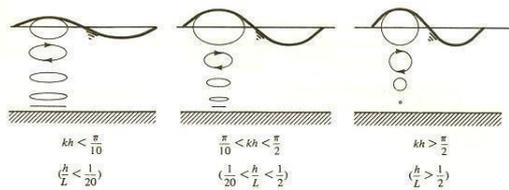
(1)淺水波速度： $V = \sqrt{gd}$

(2)深水波速度： $V = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$

(其中 V 為波速，L 為波長，d 為水深，g 為重力加速度。)

### 3、水分子運動軌跡:

波浪在傳遞時水分子之運動軌跡如附圖所示，由左至右代表淺水波、中間水波與深水波，深水波之水分子運動軌跡略呈圓形，而淺水波之運動軌跡則為橢圓形，由這三張圖可得出相同現象，離水氣交介面越近，水分子擾動範圍越大（其圓弧較大）。



(圖 1)不同水深之水分子運動軌跡示意圖

(摘自 Dean R.G. and R. A. Dalrymple (1984)

"Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists")

### (三) 反射定律:

- 1、反射線、入射線和法線在同一平面內。
- 2、反射線和入射線分居法線兩側。
- 3、反射角等於入射角。

## 貳、研究設備及器材

### 一、造浪器與人造海灘之製造

#### (一)、第一代造浪器(測掏空面積)

- 1、將兩根 10cm 吸管分別利用熱融膠黏上長寬為 30cm\*10cm 厚珍珠板兩端。
- 2、將馬達插入吸管中，用熱熔膠固定之，使厚珍珠板能夠隨馬達旋轉而不掉落。
- 3、將馬達用熱熔膠黏在塑膠平台上(圖 2)，把造浪器放於水槽中。
- 4、馬達兩端分別接在電源供應器之正負極(圖 3)，開啟電源使造浪器能夠旋轉。



圖 2:造浪器



圖 3:整組

## (二)、第一代人造沙灘

- 1、在透明水槽內，一端置入裁剪好的厚珍珠板使其增高，使沙灘產生應有之坡度  
模擬海床的角度。
- 2、在大珍珠板上鋪上一層 0.5 公分厚的海沙，使每次的原始沙灘趨於相同。
- 3、在水槽兩側放入適當高度之海綿條，減少波浪撞擊兩側產生駐波之影響，使波浪之製造更真實。

## (三)、第一代造浪器加人造海灘

- 1、第一代實驗器材因較薄的海沙和波高較小的海浪，使其侵蝕能露出底下紅色珍珠板，便能算出其侵蝕區域分布和面積大小。
- 2、整組實驗器材示意圖(圖 4、圖 5)

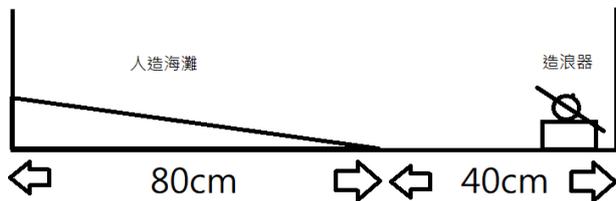


圖 4 實驗示意圖

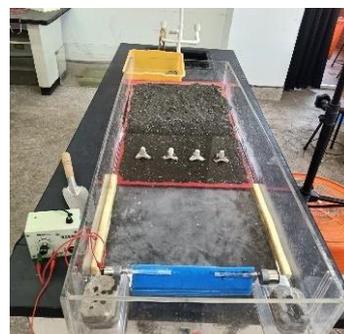


圖 5 整組實驗器材

## (四)、第二代造浪器(測掏空體積和深度)

- 1、裁剪一根長 40cm 的圓筒，以兩個輪子將其兩邊黏牢，保持其內部中空，防止水濺入而使重量改變。

- 2、裁下兩塊鑽有半徑和馬達軸心相同圓孔的厚紙板，並且孔徑位於圓心上方 1/2 半徑處，使其運轉時接近橢圓柱，較能使波連續並且更接近正弦波(圖 6)。
- 3、將這兩小塊厚紙板分別貼在兩輪子上，並用熱熔膠將馬達的鐵芯緊緊插入圓孔中，使圓筒能隨馬達旋轉而不掉落，形成造浪器。
- 4、把造浪器放於水槽中，兩個馬達的兩端分別接在電源供應器之正負極(圖 7)，開啟電源使造浪器能夠旋轉。



圖 6 波形



圖 7 整組

#### (五)、第二代人造沙灘

- 1、將紅色珍珠板移開，並用海沙填出斜度約為 6/70 的均勻海灘

#### (六)、第二代造浪器和人造海灘

- 1、第二代造浪器所造的波高較高且海浪強度較第一代大，當要測其侵蝕體積時，紅色珍珠板會影響侵蝕深度(當紅色珍珠板露出，該處侵蝕現象便停)，所以利用第二代人造海灘才能算出真實掏空體積。

- 2、整組實驗示意圖(圖 8、圖 9)

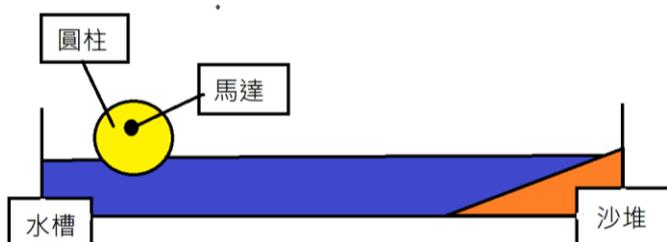
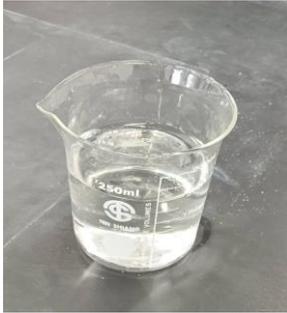
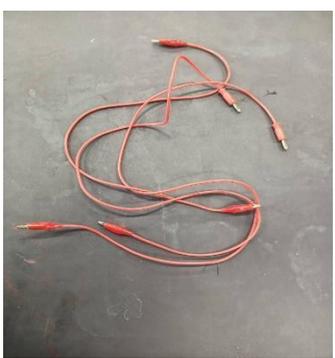


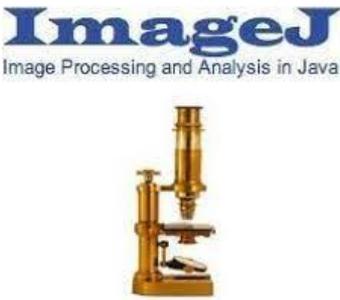
圖 8 整組實驗示意圖



圖 9 整組實驗器材圖

## 二、實驗器材

器材	壓克力水槽	沙子	水
圖示	 圖 10	 圖 11	 圖 12
用途	裝水和沙子。	形成沙岸。	模擬海水。
器材	珍珠板	電源供應器	馬達
圖示	 圖 13	 圖 14	 圖 15
用途	形成有斜度之斜坡。	使馬達轉動。	帶動吸管旋轉。
器材	吸管	電線	消波塊
圖示	 圖 16	 圖 17	 圖 18
用途	組成造浪器。	連接電源供應器。	實驗主要研究主體。

器材	手機架	image j	尺
圖示	 圖 19	 圖 20	 圖 21
用途	架高手機作為拍攝。	分析圖片。	量測距離。
器材	雷射測距儀	圓柱	
圖示	 圖 22	 圖 23	
用途	量測該點距測距儀的距離。	第二代造浪器的元件。	

### 三、模擬海岸與真實海岸比較

- 1、確認所造之浪是否為淺水波：檢視我們所拍攝到的實驗影像，波長的直接量測誤差值較大，所以以波速與頻率(0.5Hz)來換算波長，我們以 tracker 追蹤波浪，得到波速為 0.560m/s，換算得波長為 112 公分，大於水深(3 公分)的 20 倍，符合淺水波之定義。
- 2、確認所造之浪是否為重力波：我們模擬的海水波長大於 1.74cm，表示其為重力波，而非表面張力波。

## 參、研究過程或方法

### 一、流程圖

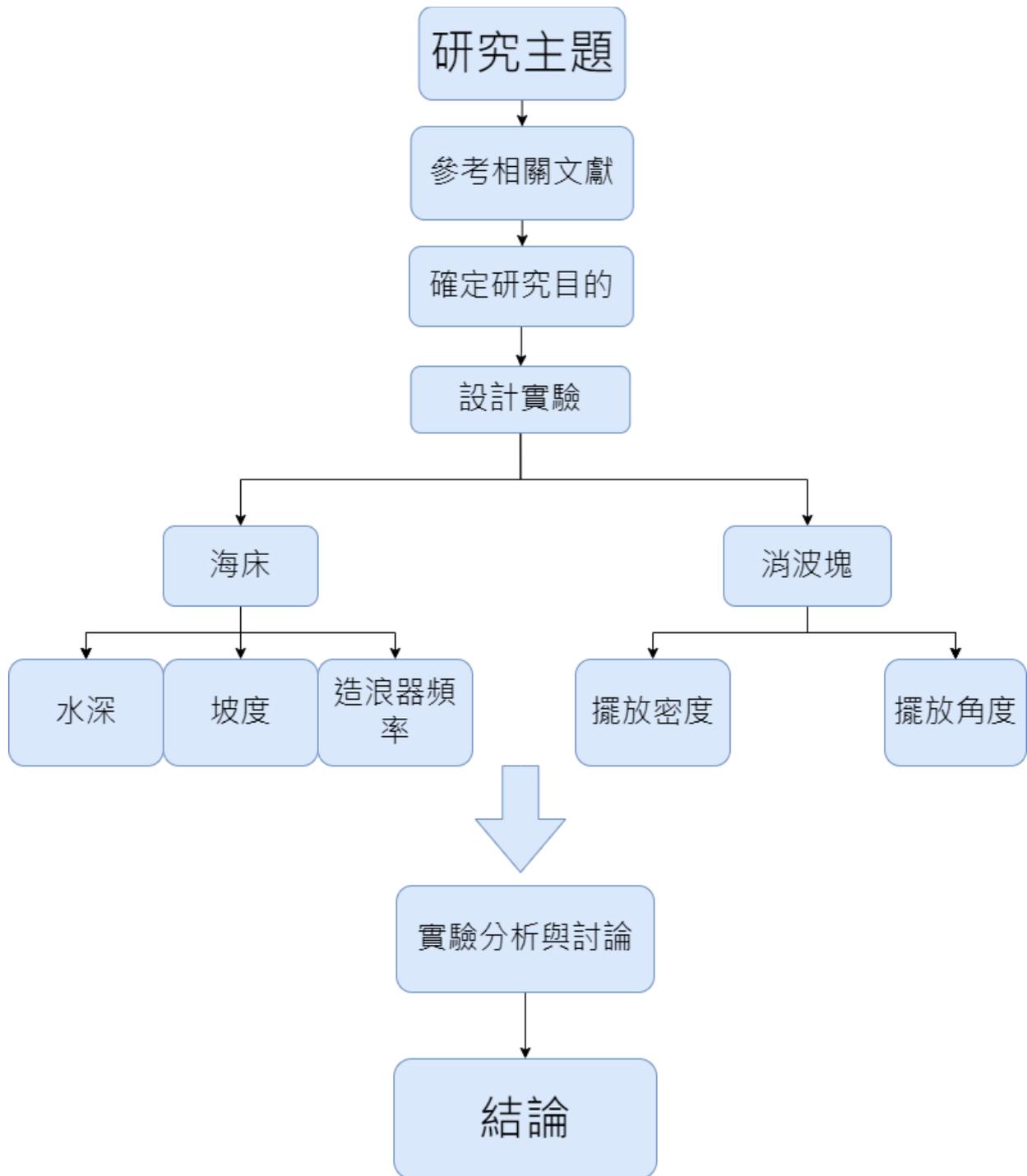


圖 24 流程圖

## 二、侵蝕面積量測之實驗步驟

### (一)觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布。

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%(圖 25)。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水(圖 26)。
- 3、於水槽正上方架設手機(圖 27、圖 28)，拍攝記錄實驗過程。
- 4、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積(圖 29)。
- 6、重複上述內容 5 次並取面積平均值。
- 7、比對出何處為此人造沙灘侵蝕最強處。

### (二)觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水。
- 3、置放一個消波塊於距海岸線 35 公分處，使其單角處背對海岸線，於水槽正上方架設手機，拍攝記錄實驗過程。
- 4、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積。
- 6、重複上述內容 5 次並取面積平均值。
- 7、將消波塊順時針轉 180 度，使單角處正對海的方向，並重複 1 至 6 之步驟。

### (三)探討波浪頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水。
- 3、置放四個消波塊於距海岸線 35 公分處，使其單角處背對海岸線，於水槽正上方架設手機，拍攝記錄實驗過程。

- 4、置入自製造浪器，並調整電源供應器至電壓 6V，使之以頻率 0.5Hz 轉動。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積。
- 6、再調整電源供應器電壓至 9V，使造浪器以頻率 1Hz 轉動，並重複 1 至 5 之步驟。
- 7、紀錄實驗數據。

#### (四)探討海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水。
- 3、置放四個消波塊於距海岸線 35 公分處，使其單角處背對海岸線，於水槽正上方架設手機，拍攝記錄實驗過程。
- 4、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積。
- 6、重複上述內容 5 次並取面積平均值。
- 7、再注入水調整海床深度至 4 公分，並重複 1 至 6 之步驟。
- 8、再注入水調整海床深度至 5 公分，並重複 1 至 6 之步驟。

#### (五)探討海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水。
- 3、置放四個消波塊於距海岸線 35 公分處，使其單角處背對海岸線，於水槽正上方架設手機，拍攝記錄實驗過程。
- 4、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積。
- 6、重複上述內容 5 次並取面積平均值。
- 7、再調整海床坡度至 6.67%，並重複 1 至 6 之步驟。

8、再調整海床坡度至 13.3%，並重複 1 至 6 之步驟。

(六)探討消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水。
- 3、置放四個消波塊於距海岸線 35 公分處，使其單角處背對海岸線，於水槽正上方架設手機，拍攝記錄實驗過程。
- 4、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積。
- 6、重複上述內容 5 次並取面積平均值。
- 7、再改為放置三個消波塊，並重複 1 至 6 之步驟。
- 8、再改為放置五個消波塊，並重複 1 至 6 之步驟。

(七)探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

- 1、於壓克力水槽中，置入一長寬分別為 90 公分與 45 公分之珍珠板模擬海床，並且設置海床坡度為 10%。
- 2、取定量沙子，鋪於固定坡度之斜坡上，使沙子厚度為 0.5 公分，再加入 3 公分深的水。
- 3、置放四個消波塊於距海岸線 35 公分處，使其單角處背對海岸線，於水槽正上方架設手機，拍攝記錄實驗過程。
- 4、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 5、錄影十分鐘之後，每三十秒截一張圖，將此二十一張照片放入 IMAGE J 分析，觀察海沙流失，導致紅色珍珠板出露之面積。
- 6、重複上述內容 5 次並取面積平均值。
- 7、再調整消波塊角度順時鐘轉 30 度，並重複 1 至 6 之步驟。
- 8、再調整消波塊角度順時鐘再轉 30 度(相較於初始狀態轉 60 度)，並重複 1 至 6 之步驟。
- 9、再調整消波塊角度順時鐘再轉 30 度(相較於初始狀態轉 90 度)，並重複 1 至 6 之步驟。



圖 25 紅色珍珠板模擬海床



圖 26 珍珠板上鋪沙照片

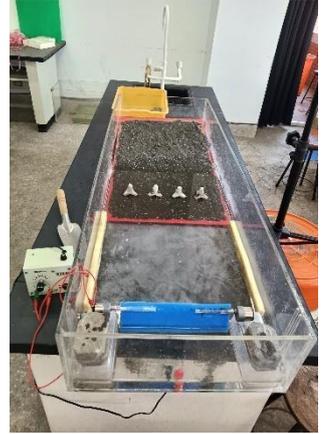


圖 27 實驗裝置俯拍照片



圖 28 實驗裝置測拍照片



圖 29 消波塊周圍侵蝕照片

### 三、侵蝕體積量測之實驗步驟

(一)探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕體積之關係。

- 1、於壓克力水槽中，將海沙緊實鋪成海床，並且設置海床坡度為 8.6%，再加入 4cm 深的水。
- 2、置放四個消波塊於距海岸線 28 公分處，使單角處背對海岸線。(由於新的設置在 28 公分為最大侵蝕處)
- 3、置入自製造浪器，並開始啟動之。
- 4、十分鐘之後，利用雷射測距儀以及 5\*21 的網格，測量消波塊擺放位置附近。(距海岸線 26 公分到 30 公分和從消波塊中心算起左右各 5cm 的長方形區域，即消波塊下沙灘侵蝕最劇處)
- 5、將各點數據輸入 excel 進行分析並做出曲面圖和多張剖面圖，計算出所取範圍內沙灘被侵蝕體積。
- 6、重複上述內容 5 次並取體積平均值。

- 7、再調整消波塊角度順時鐘轉 30 度，並重複 1 至 6 之步驟。
- 8、再調整消波塊角度順時鐘再轉 30 度(相較於初始狀態轉 60 度)，並重複 1 至 6 步驟。
- 9、再調整消波塊角度順時鐘再轉 30 度(相較於初始狀態轉 90 度)，並重複 1 至 6 之步驟。

#### 四、侵蝕面積之分析方法

- (一)將實驗照片匯入 imageJ(圖 30)。
- (二)利用 Color Threshold 模式選取範圍內(消波塊邊界往外推兩公分)紅色區域，即為侵蝕處(圖 31、圖 32)。
- (三)利用 Analyze particles 模式可得到紅色區域的面積。
- (四)將此數據複製到 excel(圖 33)。
- (五)利用 excel 之加總得到總面積的數值。
- (六)製作出圖表並分析之。

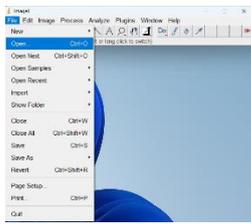


圖 30 選取照片

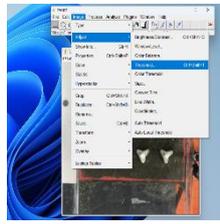


圖 31 Color Threshold

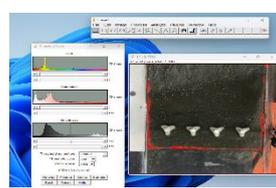


圖 32 Analyze particles

| Area |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 2    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 3    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 4    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 5    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 6    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 7    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 8    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 9    | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 10   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 11   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 12   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 13   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 14   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 15   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 16   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 17   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 18   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 19   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 20   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 21   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 22   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 23   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 24   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 25   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 26   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 27   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 28   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 29   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| 30   | 200  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |

圖 33 excel 分析

#### 五、侵蝕體積之分析方法

- (一)將實驗後高度匯入 excel，利用前後對比得到橫切侵蝕量。
- (二)將每個片面侵蝕量的量加總即可得到體積。(掏空量)

### 肆、研究結果

#### 一、觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布:

	初始圖示
	十分鐘後圖示

無消波塊	 <p data-bbox="523 468 596 501">圖 34</p>	 <p data-bbox="1043 468 1117 501">圖 35</p>
------	---	--

二、觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布:

	初始圖示	十分鐘後圖示
單角處 背對海岸	 <p data-bbox="523 1039 603 1072">圖 36</p>	 <p data-bbox="1038 1039 1118 1072">圖 37</p>
單角處 面對海岸	 <p data-bbox="523 1429 603 1462">圖 38</p>	 <p data-bbox="1046 1429 1126 1462">圖 39</p>

三、探討造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

	初始圖示	十分鐘後圖示
頻率 0.5Hz	 <p data-bbox="520 1957 600 1991">圖 40</p>	 <p data-bbox="1051 1957 1131 1991">圖 41</p>

		侵蝕面積:134 平方公分
頻率 1Hz	 <p>圖 42</p>	 <p>圖 43</p> <p>侵蝕面積:718 平方公分</p>

四、探討海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

	初始圖示	十分鐘後圖示
水深 3 公分	 <p>圖 44</p>	 <p>圖 45</p> <p>侵蝕面積:135 平方公分</p>
水深 4 公分	 <p>圖 46</p>	 <p>圖 47</p> <p>侵蝕面積:112 平方公分</p>
水深 5 公分	 <p>圖 48</p>	 <p>圖 49</p> <p>侵蝕面積:45 平方公分</p>

五、探討海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

	初始圖示	十分鐘後圖示

海床坡度 6.67%	 圖 50	 圖 51 侵蝕面積:79 平方公分
海床坡度 10.00%	 圖 52	 圖 53 侵蝕面積:135 平方公分
海床坡度 13.33%	 圖 54	 圖 55 侵蝕面積:180 平方公分

六、探討消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

	初始圖示	十分鐘後圖示
三個 消波塊	 圖 56	 圖 57 侵蝕面積:124 平方公分

<p>四個 消波塊</p>	 <p>圖 58</p>	 <p>圖 59 侵蝕面積:435 平方公分</p>
<p>五個 消波塊</p>	 <p>圖 60</p>	 <p>圖 61 侵蝕面積:936 平方公分</p>

七、消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

	<p>初始圖示</p>	<p>十分鐘後圖示</p>
<p>0 度</p>	 <p>圖 62</p>	 <p>圖 63 侵蝕面積:552 平方公分</p>

<p>30 度</p>	 <p>圖 64</p>	 <p>圖 65 侵蝕面積:280 平方公分</p>
<p>60 度</p>	 <p>圖 66</p>	 <p>圖 67 侵蝕面積:125 平方公分</p>
<p>90 度</p>	 <p>圖 68</p>	 <p>圖 69 侵蝕面積:344 平方公分</p>

八、消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕體積之關係

	初始圖示	十分鐘後圖示
0 度	 <p>圖 70</p>	 <p>圖 71</p>
30 度	 <p>圖 72</p>	 <p>圖 73</p>
60 度	 <p>圖 74</p>	 <p>圖 75</p>
90 度	 <p>圖 76</p>	 <p>圖 77</p>

## 伍、討論

### 一、觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布:

我們發現侵蝕區域主要分布在距離海岸線 34 公分到 36 公分處，表示此處侵蝕大於堆積。因此我們之後的實驗設計，均將消波塊置放於距離海岸線 35 公分處，用以觀察擺放消波塊後此處侵蝕與堆積的情況。

### 二、觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布:

由圖 37、39 可知，消波塊的三個角隨時間推移而有侵蝕情形並逐漸向外擴張，不論是單角朝向海或是背對海，兩角處的侵蝕皆大於一角處。

當波浪拍打消波塊體迎向海的那一側斜面，會產生一股較強勁的反射水流，因水流遵守反射定律(附圖 78)，所以會先對消波塊前方的沙灘產生向下侵蝕，形成一個凹陷處如附圖 79，當水流往海的方向退回時，消波塊角會阻攔高處回流所帶來的沙粒，以至於凹陷處無法被填補。

當水流往海的方向退回時，消波塊兩角之間的弧線區域不會阻攔回流所帶來的沙粒，使弧線區域的侵蝕較不明顯。

但由於每一次的侵蝕過程，沙粒被帶動的路徑、侵蝕裸露的區域與範圍，均略有不同，使得消波塊附近的水流方向不斷改變，導致雖然主要區域會分布在兩角附近，但最顯著的侵蝕區域位置有時會在兩角前側、有時會在兩角後側(以海的方向作相對位置)。

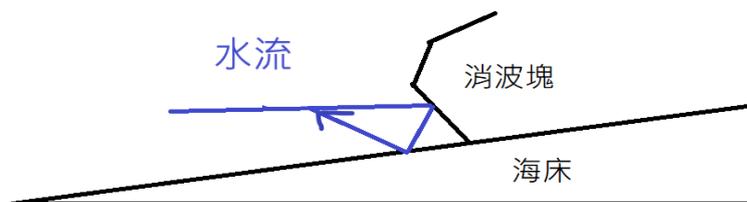


圖 78 消波塊側面侵蝕示意圖

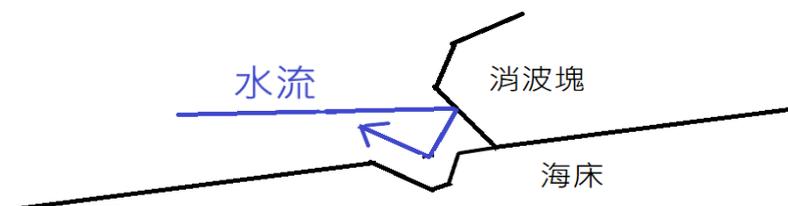


圖 79 消波塊側面侵蝕示意圖

由體積測量實驗中，亦能佐證消波塊下方沙灘侵蝕情形，我們取消波塊擺放角度 0 度 (如圖 86A) 的距海岸線 26 公分，以及 30 公分處之垂直侵蝕剖面圖(圖 80)，從下圖可看出雙角處(藍色)的侵蝕量明顯大於單角處(紅色)。

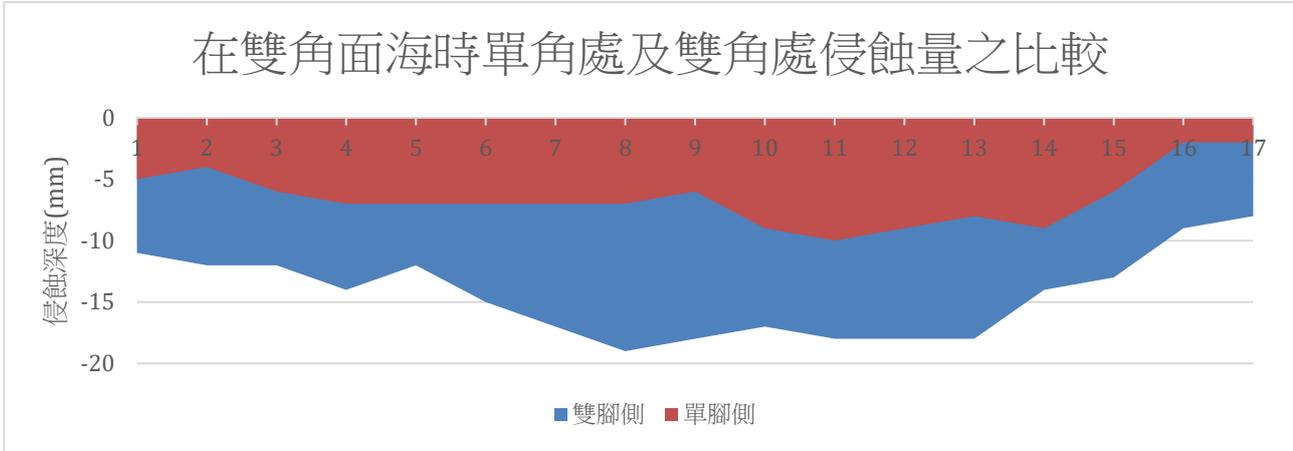


圖 80 雙角面海時單角處及雙角處侵蝕量之關係圖

### 三、探討造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

設定造浪器的頻率為 0.5Hz 與 1Hz 做出兩組實驗，從圖 81 可知，頻率 0.5Hz 所造成的侵蝕面積總和小於頻率 1Hz。

我們推論由於頻率越大，造浪器就會在單位時間內產生更大的能量，即所造成之侵蝕面積越大，因此推論單位時間內波浪給予消波塊的能量越大，消波塊下方的侵蝕面積越大。

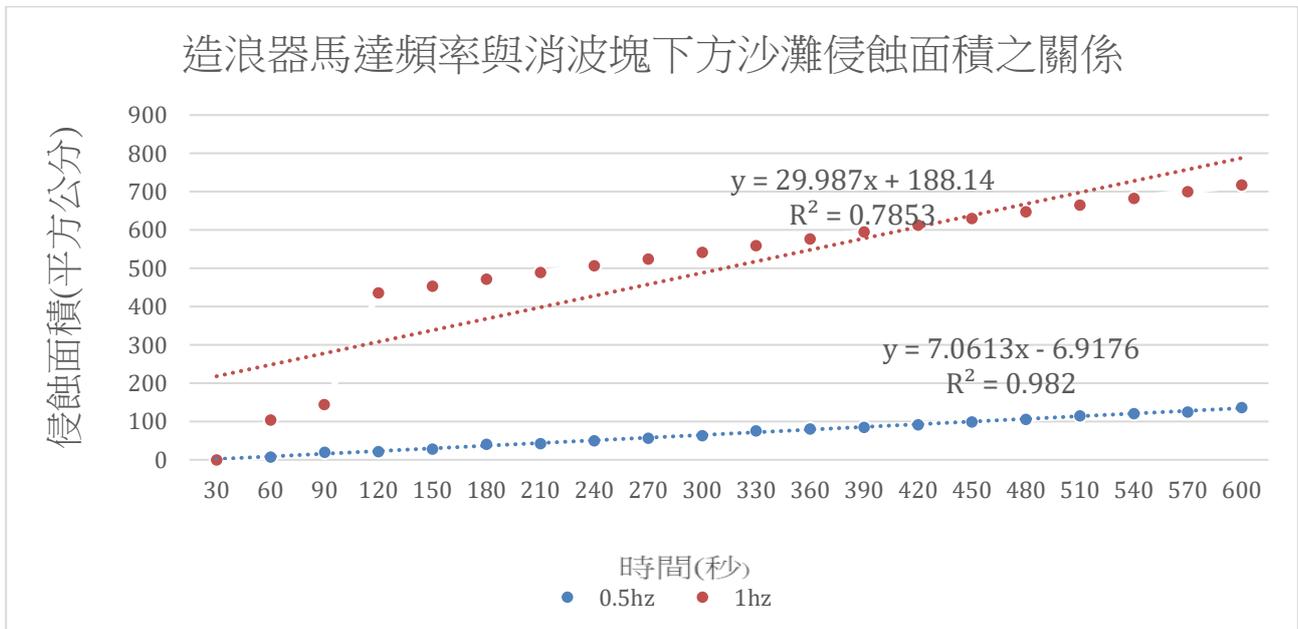


圖 81 造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

### 四、探討海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

當控制其他因素不變時，我們改變海水深度為操作變因，但為了維持造浪器的扇葉吃水深度相同，我們依照不同深度，利用了厚度不同的厚紙板作為增高，如圖 82。

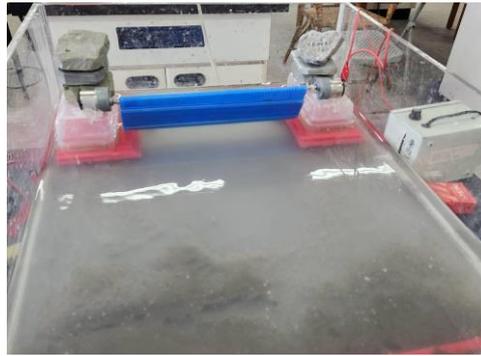


圖 82 造浪器增高示意圖

由圖 83 可知，深度為 5cm 所侵蝕的面積為最小，而深度為 3cm 的為最大，我們推知海水深度和侵蝕面積成負相關。

已知水分子運動軌跡，離水氣交介面越遠，水分子擾動範圍越小，由於我們發現消波塊主要侵蝕的部分為其兩角處附近，在不同深度時，由於造浪器產生的波浪主要帶動表層海水，而較深的水則受到較少的擾動，故水深 3 公分時，由於水深較淺，消波塊的兩角處正對著水分子擾動最大的表層海水，造成侵蝕較明顯，而水深 5 公分時，由於水深較深，消波塊的兩角處位於水分子擾動較小處，故其造成侵蝕較不明顯，因此海水深度和侵蝕面積呈負相關。

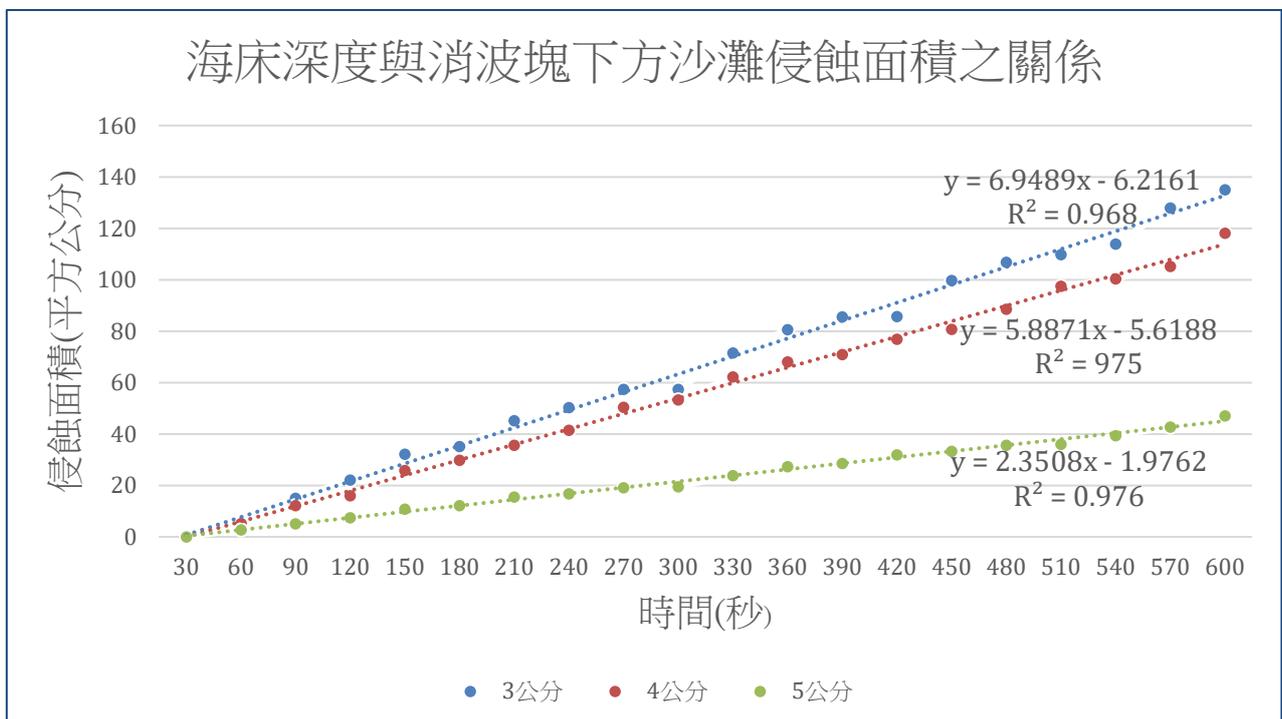


圖 83 海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

### 五、探討海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係

由圖 84 可知，當我們固定四個消波塊排一排，與海岸線距離皆為 35cm 時，坡度較大的沙灘其侵蝕面積最大，而坡度越小則反之，推出坡度與所侵蝕的面積成正相關。

我們推論坡度較大的沙灘會使海沙受到較大下滑力，懸浮的海沙會被帶得更遠，對於沙灘的侵蝕更加容易且顯著。

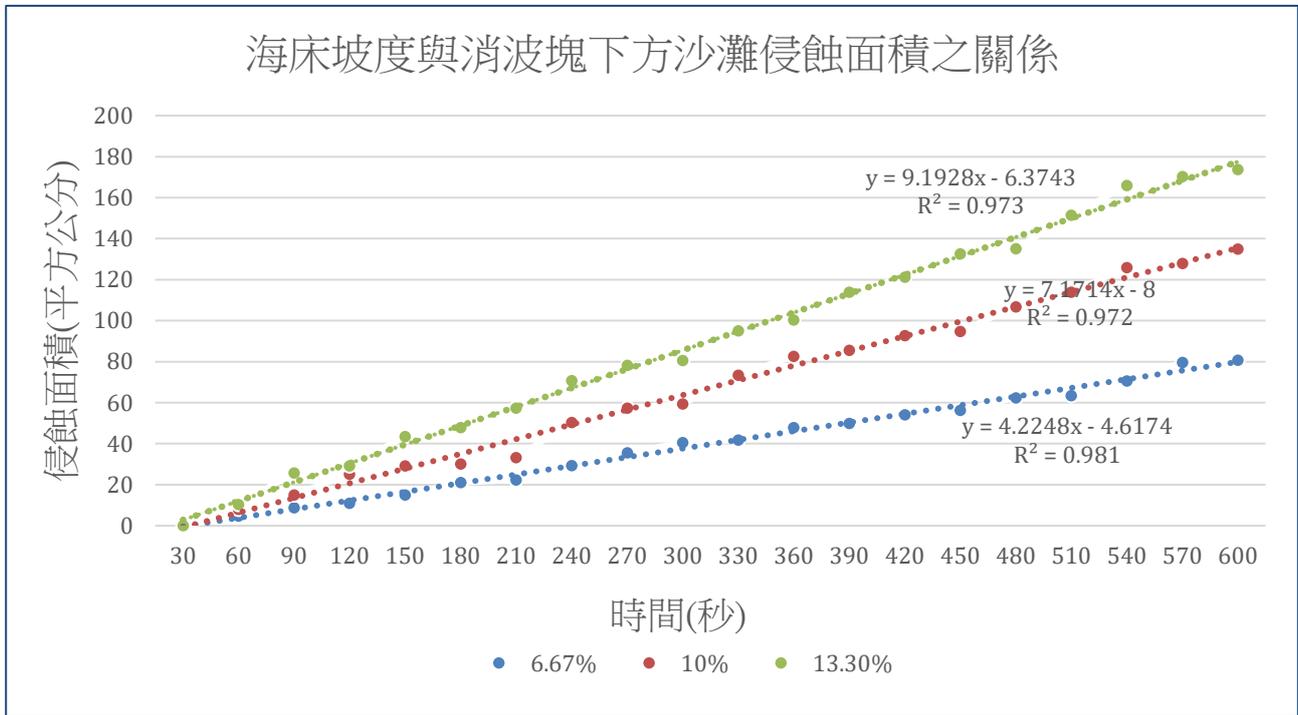


圖 84 海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

### 六、探討消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

由圖 85 可知，設定消波塊擺放的數量為操作變因，分別有 3 個、4 個、5 個消波塊的實驗。由圖 85 可看出同一排擺放的消波塊越多，其侵蝕速率也會較大。

我們推測是因為當消波塊擺得越緊密時，反射的面積越多且反射水流的方向越混亂，導致消波塊兩角處的底部海沙會更容易懸浮，使其更易受到海流的帶動而被掏空，故其侵蝕速率較大。

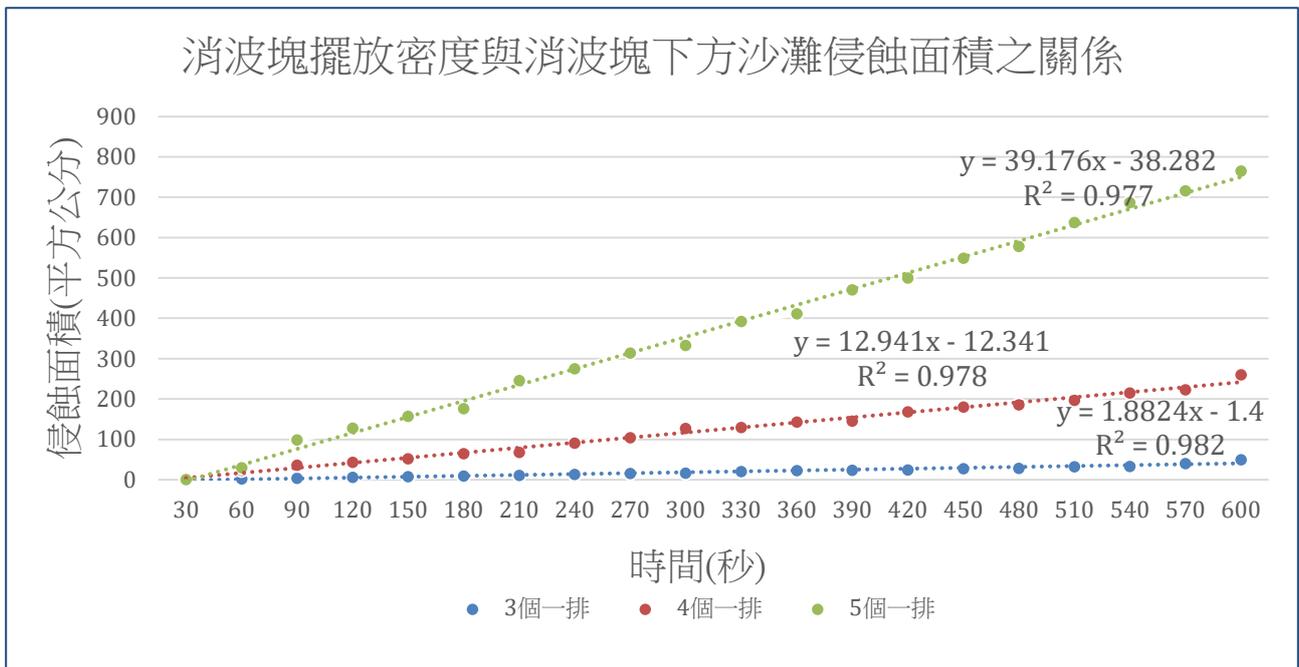


圖 85 消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

七、探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

設定消波塊的角度為操作變因，圖 86 為各個擺放角度消波塊之示意圖。由圖 87 可看出，消波塊下的侵蝕面積大小為 0 度>30 度>90 度>60 度。

由此，我們推論 0 度(如圖 86A)時消波塊兩角面海，水流的能量較強，因此侵蝕遠高於沉積，然而 60 度(如圖 86C)消波塊兩角背海，到達兩角處的水流能量較弱，使得侵蝕與沉積的差異小於 0 度，而 30 度(如圖 86B)和 90 度(如圖 86D)則是介於兩者之間。

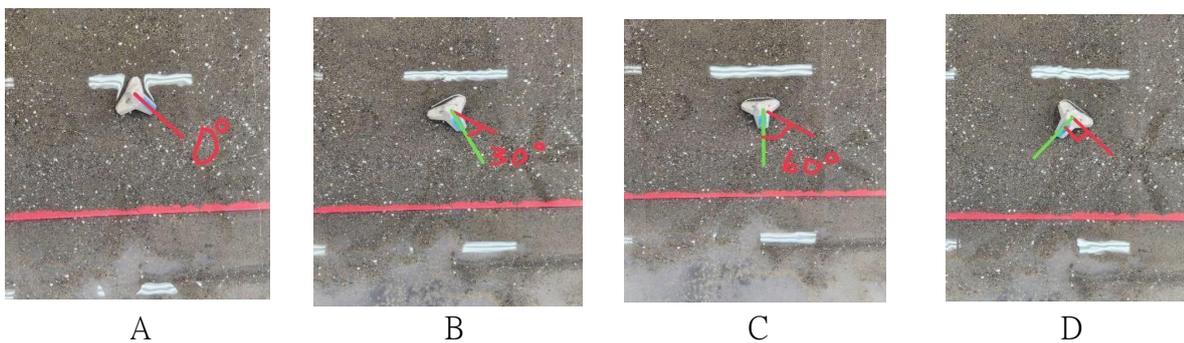


圖 86 不同消波塊擺放角度圖示

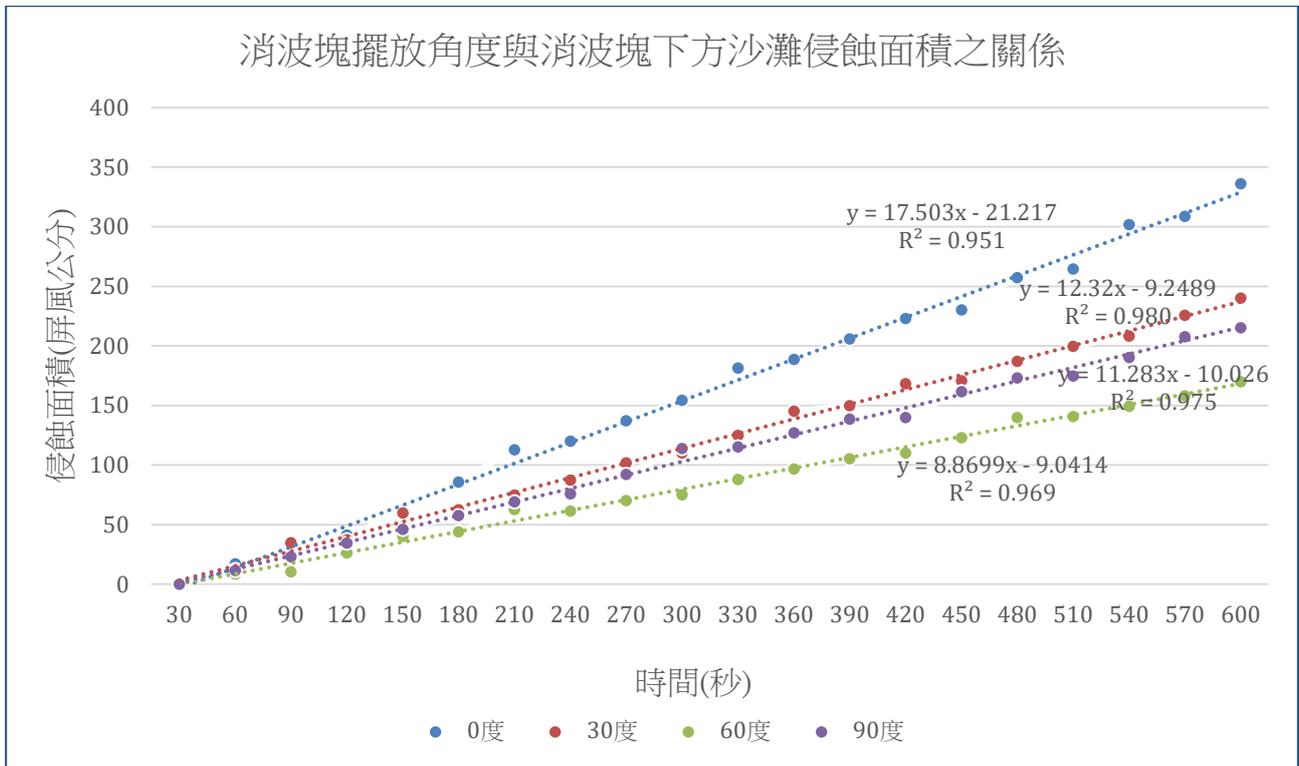
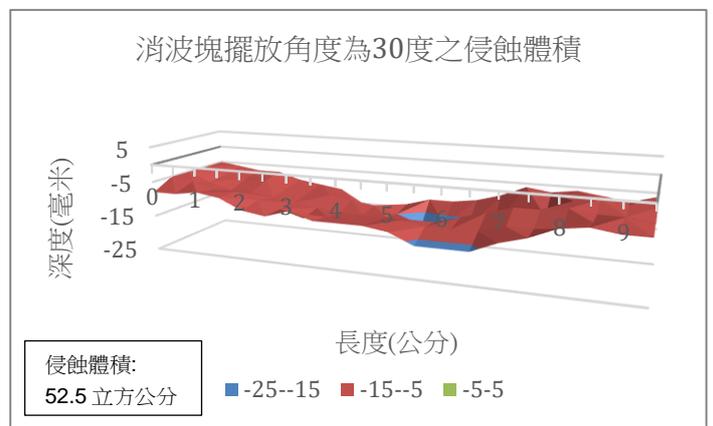
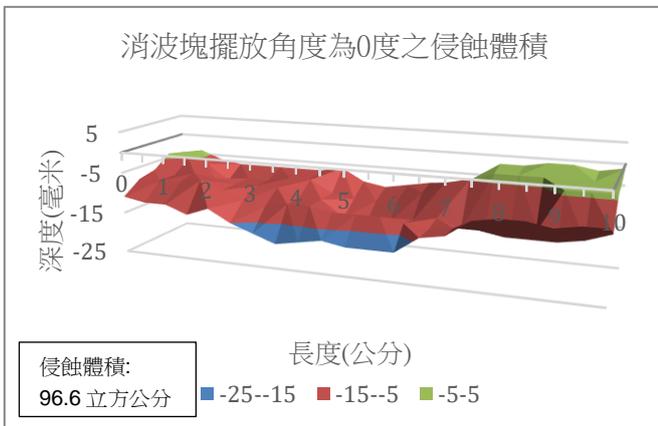


圖 87 消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

八、探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕體積之關係:

本研究起初無法克服沙灘侵蝕體積的測量技術問題，以致於之前的研究是採用觀察照片中紅色面積的大小來計算侵蝕量。而在之後技術上得到突破，可以求得體積，本實驗選擇角度作為變因，得到以下四張消波塊不同擺放角度與消波塊下方侵蝕體積之關係圖。



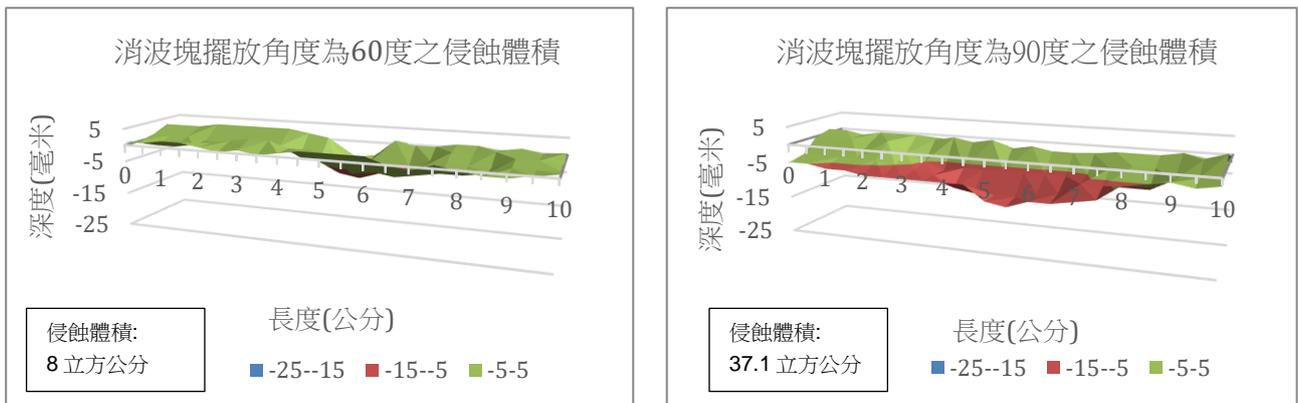


圖 88 消波塊在不同擺放角度下之侵蝕體積圖

此四張圖(圖 88)量測消波塊中心前後各 2 公分和左右各 5 公分，而消波塊擺放位置約位於圖中橫軸 5-6 公分處，由這四張侵蝕地形示意圖可看出，消波塊擺放處都明顯呈現凹陷狀況。且由圖 89 可知，侵蝕體積和侵蝕面積呈現相同的趨勢。

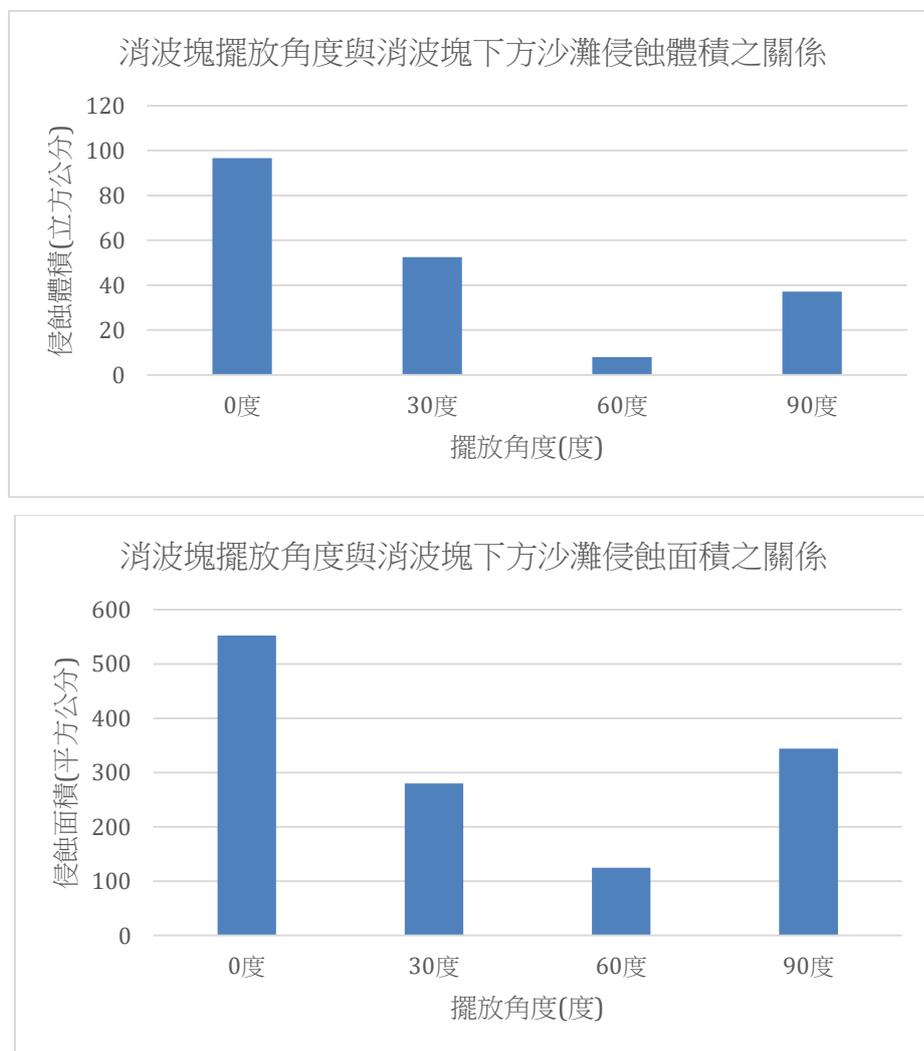


圖 89 消波塊不同擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積與體積之比較

## 陸、結論

一、觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布:

(一)距離海岸線 35 公分處為此沙灘被波浪侵蝕最強處。

二、消波塊性質測試

(一)消波塊侵蝕和沙石流失兩角側明顯大於單角處。

(二)造浪器頻率大小和侵蝕程度成正相關。

(三)海床深度和侵蝕面積成負相關。

(四)海床坡度和侵蝕面積成正相關。

(五)消波塊擺放密度和侵蝕面積成正相關。

三、消波塊擺放之角度比較:

(一)擺放角度為 30 度和 90 度的侵蝕速率大致一樣，而擺放角度為 0 度和 60 度的侵蝕速率則是 0 度兩腳面海大於 60 度兩角背海。

## 柒、參考文獻資料

一、黃議德. (2002, April 15). 海岸巨人-----消波塊. <https://www.nmmst.gov.tw/other/B151-wc.pdf>

二、林雪美, 朱明人, & 黃映慈. (2011, November). 沙質海岸沙灘劣化與復育策略：以宜蘭海岸為例. <https://www.geo.ntnu.edu.tw/wp-content/uploads/2022/01/552.pdf>

三、張齡云, 陳冠綸, 陳昱臻, & 賴佳禾. (2006). 『波淘沙湧』--拋石養灘的探究. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/46/senior/0405/040502.pdf>

四、簡伶縈, & 蔡淑君. (2004). 浪碎何方. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/44/E/040506.pdf>

五、鄭芳松, 陳佑炘, & 呂艾庭. (2019, July 21). 具能量吸收之消波塊結構. <https://patentimages.storage.googleapis.com/48/92/33/99ae776b2b404a/TWI666362B.pdf>

## 【評語】 051904

本研究自行設計試驗設備、量測記錄、分析，探討波浪對消波塊的穩定影響，觀察細微，其中應用影像分析計算沖刷面積，量化實驗結果，頗具創意。沙灘是海岸地區動態平衡的結果，整個研究若能在長時間波浪作用後，再做進一步侵、淤影響的調查可能更具參考性。此外在說明室內實驗模擬結果時，不能忽略這些結果可能應用到野外的限制或會遇到的問題。

## 作品簡報

驚「掏」駭浪—

消波塊與沙灘地形對沙石掏空量的影響

## 摘要

本研究使用水槽與自製造浪器，模擬海岸環境，探討消波塊的擺放角度、擺放密度，以及沙灘的水深、坡度、波浪強度(造浪器頻率)，對沿岸沙石侵蝕面積的影響。利用image j 分析在不同因素下消波塊周圍沙石侵蝕之面積，以及其隨時間的變化。

研究結果發現，在不同擺放角度中，消波塊之兩角面向波浪時(本研究定義為0度)其下沙石侵蝕面積最大；在擺放密度中，發現擺放越多的消波塊，其侵蝕面積越大；在沙灘水深不同時，當水深越淺時，其侵蝕面積越大；當沙灘之坡度越大時，其侵蝕面積越大；當造浪器之頻率越大時，其侵蝕面積也會增加，而計算體積時，發現在不同擺放角度下，掏空的體積多寡跟侵蝕面積成正相關。

## 研究動機

沙岸上消波塊的設置是為了抵擋波浪侵蝕海岸線，但經過資料查詢，發現消波塊下方的沙灘會產生被掏空的現象，可能使其失去保護海岸線的功能，反而會助長海岸線的侵蝕。

消波塊對於沙灘的保護或是危害在不同條件下可能產生不同的效果，因此本研究想要探究消波塊下沙灘侵蝕量與波浪的關係，找出影響消波塊下沙灘被掏空的可能因素，並希望可以建立模型，來了解消波塊附近可能產生的危險帶。

## 研究目的

有鑑於過去的研究主要都是實際海岸的個案研究，實際海岸中的因素頗多且容易交互影響，難以人為控制變因進行實驗，故以水槽實驗試圖找出以下關係:

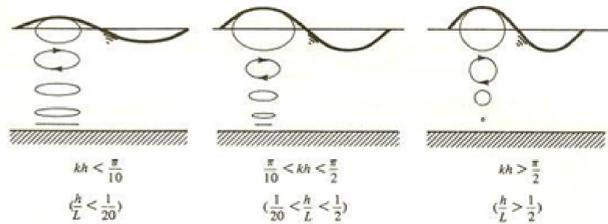
- 一、觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布。
- 二、觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布。
- 三、探討造浪器頻率與消波塊下沙灘侵蝕面積之關係。
- 四、探討海床深度與消波塊下沙灘侵蝕面積之關係。
- 五、探討海床坡度與消波塊下沙灘侵蝕面積之關係。
- 六、探討消波塊擺放密度與消波塊下沙灘侵蝕面積之關係。
- 七、探討消波塊擺放角度與消波塊下沙灘侵蝕面積之關係。
- 八、探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕體積之關係。

## 文獻回顧

沙灘坡度較緩，沙灘較為寬廣，海岸較為穩定，所受侵蝕後退較不顯著(許民陽，2002)，但林雪美(2011)的論文顯示在新北頂寮沙灘放置消波塊後，沙灘坡度變陡，可能導致沙灘變得不太穩定，更容易受到波浪侵蝕。消波塊本身也可能因為下方的沙灘被掏空而移位，無法有效地防止沙灘的侵蝕，無法達到當初防止沙灘侵蝕的目的。

### 一、水分子運動軌跡:

波浪在傳遞時水分子之運動軌跡如附圖所示，由左至右代表淺水波、中間水波與深水波，深水波之水分子運動軌跡略呈圓形，而淺水波波之運動軌跡則為橢圓形，由這三張圖可得出相同現象，離水氣交界面越近，水分子擾動範圍越大。



淺水波、中間波與深水波之水分子運動軌跡  
(摘自Dean R.G. and R. A. Dalrymple (1984)

"Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists")

### 二、模擬海岸與真實海岸比較

- (一) 確認所造之浪是否為淺水波：檢視我們所拍攝到的影像，以波速與頻率(0.5Hz)來換算波長，以 tracker 追蹤波浪，得到波速為0.560m/s，換算得波長為 112 公分，大於水深(3 公分)的 20 倍，符合淺水波之定義。
- (二) 確認所造之浪是否為重力波：我們模擬的波浪波長大於 1.74cm，表示其為重力波，而非表面張力波。

## 實驗器材

### 一、人造海灘和造浪器製造

壓克力水槽、沙子、珍珠板、電源供應器、馬達、吸管、電線、消波塊。

### 二、測量工具

手機架、image j、尺。

### 三、造浪器之製造

- (一) 將兩根吸管分別黏厚珍珠板兩端，再將馬達固定在吸管上。
- (二) 馬達兩端分別接在電源供應器之正負極，使造浪器能夠旋轉。

### 四、人造沙灘之製造

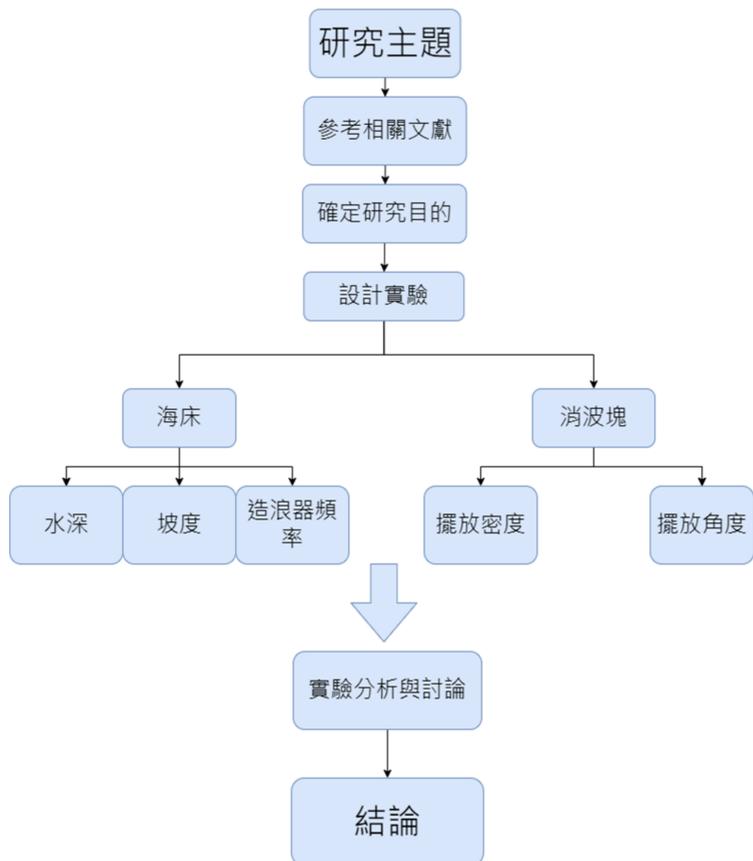
- (一) 在透明水槽中置入厚珍珠板，再鋪上一層0.5公分厚的海沙。
- (二) 在水槽兩側放入海綿條，減少波浪撞擊兩側之影響。



實驗裝置照片

## 研究過程或方法

### 一、流程圖



### 二、實驗步驟

- (一) 本實驗於壓克力箱中置入珍珠板，並且測出所需傾角。
- (二) 取定量沙子，平鋪於固定斜度之斜坡，使沙子厚度為 0.5cm，再加入3cm深的水。
- (三) 放入消波塊於距沿岸15cm之沙石上，利用手機架架高手機並拍攝記錄初始狀況。
- (四) 置入自製起波器，並開始啟動之。
- (五) 錄影10分鐘後，每30秒截一張圖，分析此21張圖。
- (六) 將此21張照片放入IMAGE J分析。
- (七) 觀察沙石於珍珠板上面積分布之改變。
- (八) 重複上述內容5次並取平均。

### 三、分析方法

- (一) 將實驗照片匯入imageJ。
- (二) 利用Color Threshold模式選取範圍內(紅色區域)，即為侵蝕處。
- (三) 利用Analyze particles 模式可得到紅色區域的面積。
- (四) 將此數據複製到excel。
- (五) 利用excel 之加總得到總面積的數值。
- (六) 製作出圖表並分析之。

## 研究結果

### 一、觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布：

	初始圖示	10分鐘後圖示
無消波塊		

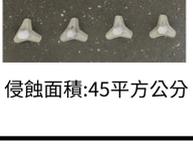
### 二、觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布：

	初始圖示	10分鐘後圖示
單角處背對海岸		
單角處面對海岸		

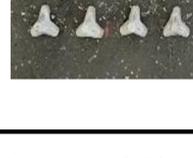
### 三、探討造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係：

	初始圖示	10分鐘後圖示
0.5Hz		 侵蝕面積:135平方公分
1Hz		 侵蝕面積:718平方公分

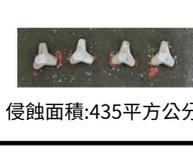
### 四、探討海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係：

	初始圖示	10分鐘後圖示
水深3公分		 侵蝕面積:135平方公分
水深4公分		 侵蝕面積:112平方公分
水深5公分		 侵蝕面積:45平方公分

### 五、探討海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係：

	初始圖示	10分鐘後圖示
海床坡度 6.7%		 侵蝕面積:79平方公分
海床坡度 10%		 侵蝕面積:135平方公分
海床坡度 13.3%		 侵蝕面積:180平方公分

### 六、探討消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係：

	初始圖示	10分鐘後圖示
3個消波塊		 侵蝕面積:124平方公分
4個消波塊		 侵蝕面積:435平方公分
5個消波塊		 侵蝕面積:936平方公分

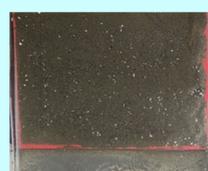
### 七、消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係：

	初始圖示	十分鐘後圖示
0度		 侵蝕面積:552平方公分
30度		 侵蝕面積:280平方公分
60度		 侵蝕面積:125平方公分
90度		 侵蝕面積:344平方公分

## 討論

### 一、觀察自製海岸環境，受波浪侵蝕之區域分布：

我們發現侵蝕區域主要分布在距離海岸線34到36公分處，因此我們之後的實驗設計，均將消波塊置放於距離海岸線35公分處，用以觀察擺放消波塊後此處侵蝕與堆積的情況。



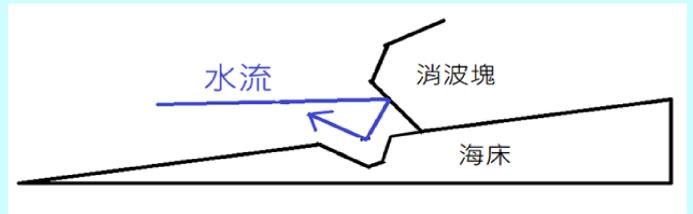
無消波塊侵蝕前



無消波塊侵蝕後

## 二、觀察消波塊下方沙灘侵蝕的區域位置分布:

當波浪拍打消波塊體迎向海的那一側斜面，會產生一股較強勁的反射水流，因水流遵守反射定律，所以會先對消波塊前方的沙灘產生向下侵蝕，形成一個凹陷處如附圖，當水流往海的方向退回時，消波塊角攔回流所帶來的沙粒，使凹陷處無法被填補，故消波塊的三個角會隨時間推移而有侵蝕情形。

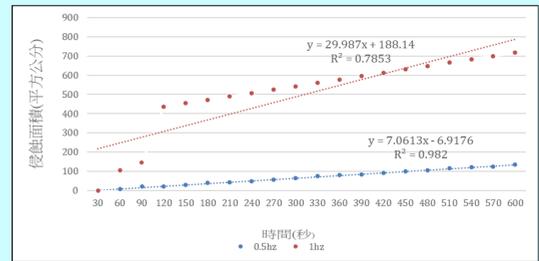


消波塊側面侵蝕示意圖

## 三、探討造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

設定造浪器的頻率為0.5Hz與1Hz做出兩組實驗，從關係圖可知，0.5Hz所造成的侵蝕面積總和小於1Hz。

我們推論由於頻率越大，造浪器就會在單位時間內產生更大的能量，即所造成之侵蝕面積越大，因此推論單位時間內給予消波塊的能量越大，消波塊下方的侵蝕面積越大。

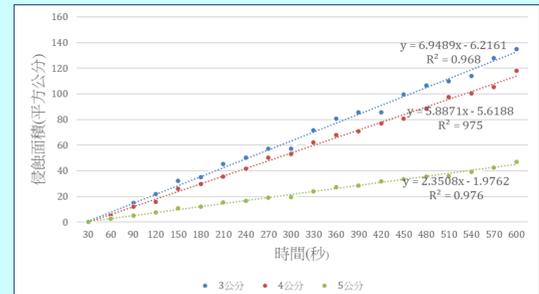


造浪器馬達頻率與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

## 四、探討海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

由右圖可知，深度為5cm所侵蝕的面積為最小，而深度為3cm的為最大，我們推知海水深度和侵蝕面積成負相關。

已知水分子運動軌跡，在不同深度時，由於造浪器產生的波浪主要帶動表層海水，而較深的水則受到較少的擾動，故水深3公分時，由於水深較淺，消波塊的兩角處正對著水分子擾動最大的表層海水，造成侵蝕較明顯，而水深5公分時，因水深較深，消波塊的兩角處位於水分子擾動較小處，故其造成侵蝕較不明顯，因此海水深度和侵蝕面積成負相關。

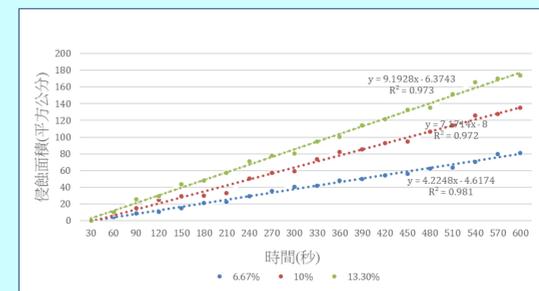


海床深度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

## 五、探討海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

由右圖可知，當我們固定四個消波塊排一排，坡度較大的沙灘其侵蝕面積最大，而坡度越小則反之，推出坡度與所侵蝕的面積成正相關。

我們推論坡度較大的沙灘會使海沙受到較大下滑力，懸浮的海沙會被帶得更遠，對於沙灘的侵蝕更加容易且顯著。

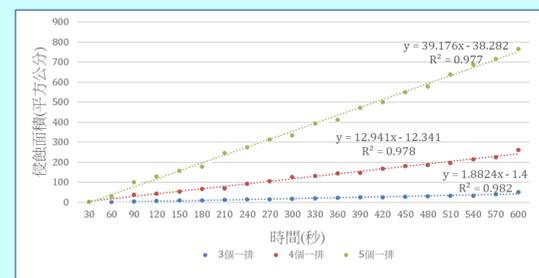


海床坡度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

## 六、探討消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

設定消波塊擺放的數量為操作變因，分別有3個、4個、5個消波塊的實驗。由右圖可看出同一排擺放的消波塊越多，其侵蝕速率也會較大。

我們推測是因為當消波塊擺得越緊密時，反射的面積越多且反射水流的方向越混亂，導致消波塊兩角處的底部海沙會更容易懸浮，使其受到海流的帶動而被掏空，故其侵蝕速率較大。

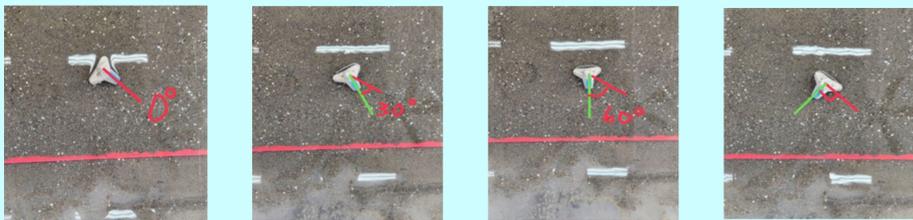


消波塊擺放密度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

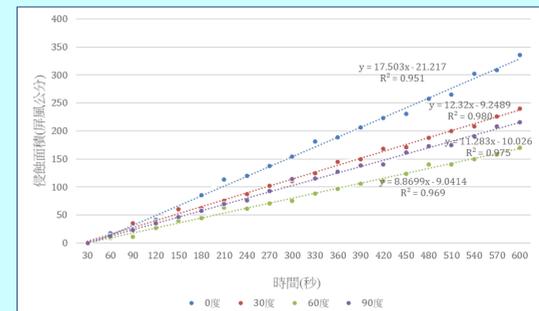
## 七、探討消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係:

設定消波塊的角度為操作變因，由右圖可看出，消波塊下的侵蝕面積大小為0度>30度>90度>60度。

由此，我們推論0度時消波塊兩角面海，水流的能量較強，因此侵蝕遠高於沉積，然而60度消波塊兩角背海，到達兩角處的水流能量較弱，使得侵蝕與沉積的差異小於0度，而30度和90度則是介於兩者之間。



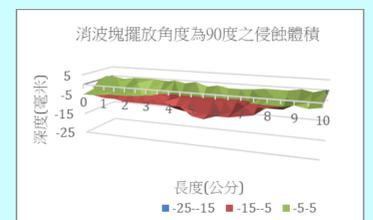
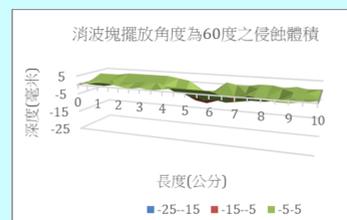
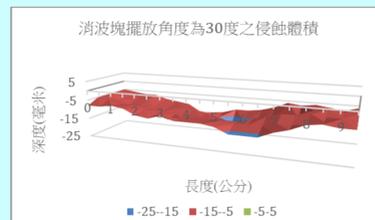
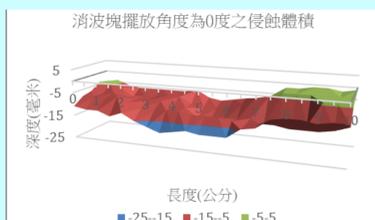
不同消波塊擺放角度圖示



消波塊擺放角度與消波塊下方沙灘侵蝕面積之關係圖

## 八、探討消波塊擺放角度與消波塊旁沙石掏空量之關係:

本研究起初並未想到體積的測量方法，主要是觀察照片中紅色面積的改變，但這只能觀察侵蝕情形，並不能完全取決與掏空量呈正相關，因此需要做本實驗進行佐證，而在面積方法得到成果之後，技術上得到突破可以求得體積，本實驗選擇角度作為變因，得到以下四張角度與消波塊下方侵蝕體積關係圖。



## 結論

- 一、距離海岸線35cm為此沙灘被波浪侵蝕最強處。
- 二、消波塊侵蝕和沙石流失主要位於兩角側。
- 三、造浪器頻率大小和侵蝕程度成正相關。
- 四、海床深度和侵蝕面積成負相關。

- 五、海床坡度和侵蝕面積成正相關。
- 六、消波塊擺放密度和侵蝕面積成正相關。
- 七、擺放角度為30度和90度的侵蝕速率大致一樣，而擺放角度為0度和60度的侵蝕速率則是0度兩腳面海大於60度兩角背海。

## 參考文獻資料

一、黃議德. (2002, April 15). 海岸巨人----消波塊. <https://www.nmmst.gov.tw/other/B151-wc.pdf>

二、林雪美, 朱明人, & 黃映慈. (2011, November). 沙質海岸沙灘劣化與復育策略：以宜蘭海岸為例. <https://www.geo.ntnu.edu.tw/wp-content/uploads/2022/01/552.pdf>

三、張齡云, 陳冠綸, 陳昱臻, & 賴佳禾. (2006). 『波淘沙湧』--拋石養灘的探究. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/46/senior/0405/040502.pdf>

四、簡伶縈, & 蔡淑君. (2004). 浪碎何方. <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/44/E/040506.pdf>

五、鄭芳松, 陳佑斯, & 呂艾庭. (2019, July 21). 具能量吸收之消波塊結構. <https://patentimages.storage.googleapis.com/48/92/33/99ae776b2b404a/TWI666362B.pdf>