

中華民國第 60 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

051904

2018 年帕盧海嘯的模擬與探討

學校名稱：國立嘉義女子高級中學

作者： 高二 鄭伊茹 高二 劉 詠 高二 葉幼華	指導老師： 劉乃菁 陳盈霖
---	-----------------------------

關鍵詞：海嘯、共振、快速傅立葉轉換

摘要

本研究利用 4.8m 長水槽及校園內池塘，製造擾動找出波浪堆高的因素，由模擬的過程，探討 2018 年 9 月 28 日印尼強震引起帕盧(Palu)海嘯的原因。我們各種方法在水面製造擾動；用錄影、超音波感測器觀測；用 Tracker 分析水波傳遞影像、EXCEL 將數據作傅立葉頻譜分析，實驗結果和我們查閱的文獻資料綜合判斷，得到 Palu 海嘯主要來自以下因素：

- 一、Palu 海灣連接的河谷地形為低角度的緩坡，所以波浪易堆高。
- 二、塊體崩塌只影響局部的地點，不是 Palu 海嘯的主因。
- 三、和海灣走向平行的擾動方向，能引起更大的水位變化，所以造成這次海嘯的主要斷層最可能是和 Palu 海灣走向平行的南北向斷層。
- 四、頻繁餘震和水波形成耦合共振效應、海灣邊界效應形成多個反射波干涉，都是造成 Palu 海嘯的原因。

壹、研究動機

2018 年 9 月 28 日印尼蘇維埃西島發生強震，以及強震引起的海嘯，在帕盧(Palu)造成重大傷亡，令人十分難過。根據報導，當地在地震後雖發布海嘯警報，但實際的海嘯波高遠大於預測值，許多測站都觀測到 3 公尺以上的高度。這次海造成 10000 多人受傷，7000 多人失蹤或死亡。海嘯災情遠大於事前的預警，是因為引起海嘯的地震，來自一個垂直位移非常小的逆滑移斷層(slip-dip fault)，因此當地在發布海嘯警報之後半小時又解除警報。我們查閱的部分資料顯示，地震引起局部海底崩塌可能是造成海嘯波浪變高的原因；此外，地震之斷層走向，頻繁的餘震，以及 Palu 海灣形狀對波浪堆高的影響，也引起了我們對這個事件的關注與興趣，因此我們設計實驗，著手進行這次的研究。

貳、研究目的

- 一、探討海底地形坡度對浪高和頻率分布的影響
- 二、探討海底塊體崩塌對浪高和頻率分布的影響
- 三、探討斷層滑移走向對頻率分布的影響
- 四、探討斷層滑移走向對浪高的影響

參、研究設備和器材

- 一、水槽實驗部分器材
此照片為 4.8 公尺長的實驗水槽；水槽內利用磚塊布置陡坡和緩坡。

(圖一)實驗水槽全貌



以下照片為進行水槽實驗時所需物品：



1.磚頭數塊



2.與水槽同寬的瓷磚兩塊



3.海綿數塊



4.Arduino UNO R3 兩塊



5.杜邦線與電線數條



6.超音波感測器三個

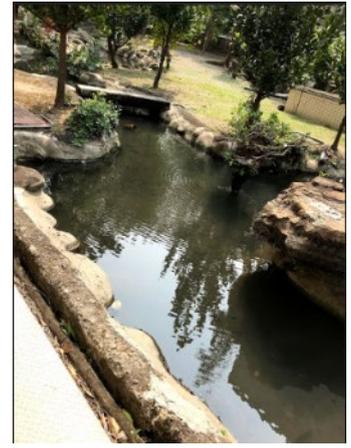


7.與水槽同寬的木板

8.筆電兩台

二、水池實驗部分：水池實驗主要探討震源的斷層破裂方向和塊體崩塌對波浪堆高及波浪頻率分布的影響。

(圖二) 作為實驗的水池因為具有與帕盧海灣相似的地形而成為實驗地點。



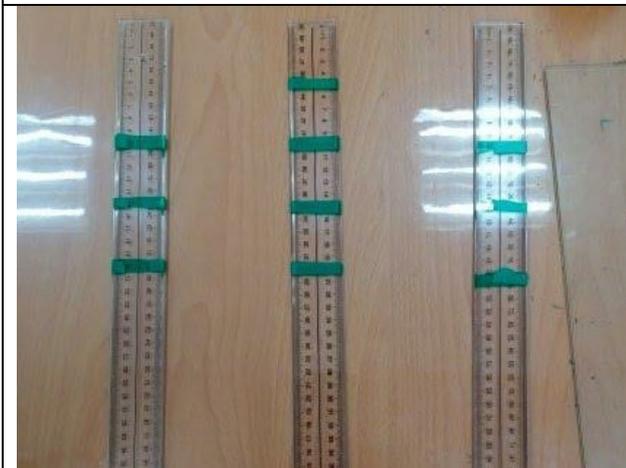
圖三 以下照片為進行水槽實驗時所需物品：



1.自製起波器



2.筆電兩台



3.尺(50cm)三把

- 4.Arduino UNO R3 兩塊
- 5.超音波感測器三個
- 6.杜邦線與電線數條
- 7.磚頭數塊

三、軟體部分；

- (一)、excel 應用程式
- (二)、Tracker 分析軟體
- (三)、外接超音波感測器之 arduino 程式

```
doublesensor
/* 兩個超音波
 *使用兩個超音波感測器偵測左右兩邊障礙物的距離。
 */
const byte trigPinR = 10 ; // 右邊超音波 觸發腳 Trig
const byte echoPinR = 9 ; //右邊超音波 接收腳 Echo
double distanceR ; // 距離 cm

const byte trigPinL = 12 ; //左邊超音波 觸發腳 Trig
const byte echoPinL = 11 ; //左邊超音波 接收腳 Echo
double distanceL ; // 距離 cm

double pingR() {
  digitalWrite(trigPinR,LOW) ;
  delayMicroseconds(5); //持續5微秒
  digitalWrite(trigPinR,HIGH) ; //觸發腳位設定為高電位
  delayMicroseconds(10); //持續10微秒
  digitalWrite(trigPinR,LOW) ;

  double duration=pulseIn(echoPinR,HIGH);
  double cm = duration/58; // 將時間換算成距離 cm

  return cm;
}
}
```

```
double pingL() {
  digitalWrite(trigPinL,LOW) ;
  delayMicroseconds(5); //持續5微秒
  digitalWrite(trigPinL,HIGH) ; //觸發腳位設定為高電位
  delayMicroseconds(10); //持續10微秒
  digitalWrite(trigPinL,LOW) ;

  double duration=pulseIn(echoPinL,HIGH);
  double cm = duration/58; // 將時間換算成距離 cm

  return cm;
}

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600) ;

  pinMode(trigPinR,OUTPUT) ;
  pinMode(echoPinR,INPUT) ;

  pinMode(trigPinL,OUTPUT) ;
  pinMode(echoPinL,INPUT) ;
}
```

[圖三] 兩個 sensor 的 Arduino 程式(1) 。 [圖四] 兩個 sensor 的 Arduino 程式(2) 。

```
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  char cbShow[64];
  char cbLeft[20];
  char cbRight[20];

  distanceR=pingR();
  distanceL=pingL();

  dtostrf(distanceR,8,2,cbRight);
  dtostrf(distanceL,8,2,cbLeft);
  sprintf(cbShow," Left= %s cm, Right= %s cm",cbLeft,cbRight);

  Serial.println(cbShow);

  delay(250);
}
```

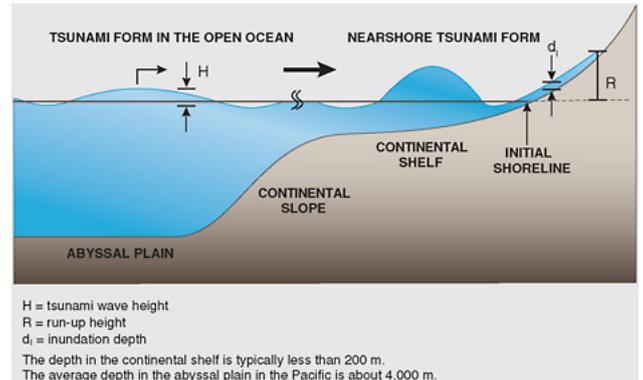
[圖五] 兩個 sensor 的 Arduino 程式(3) 。

- (四)、EXCEL→資料分析→傅立葉分析

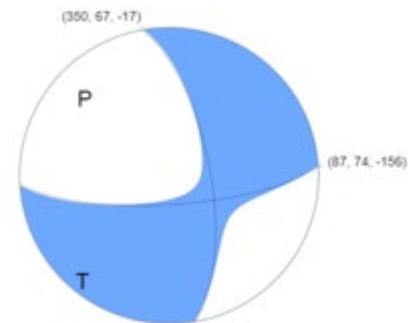
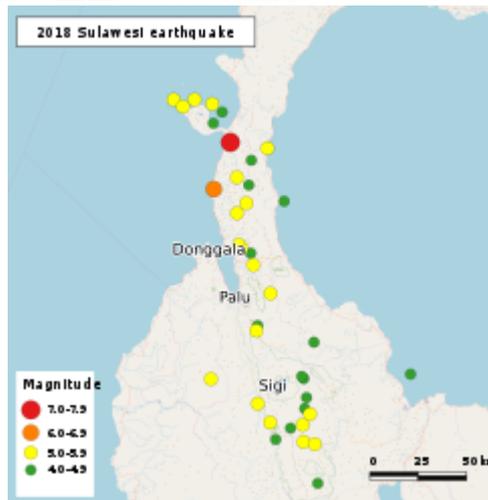
肆、研究步驟與方法

一、理論依據：

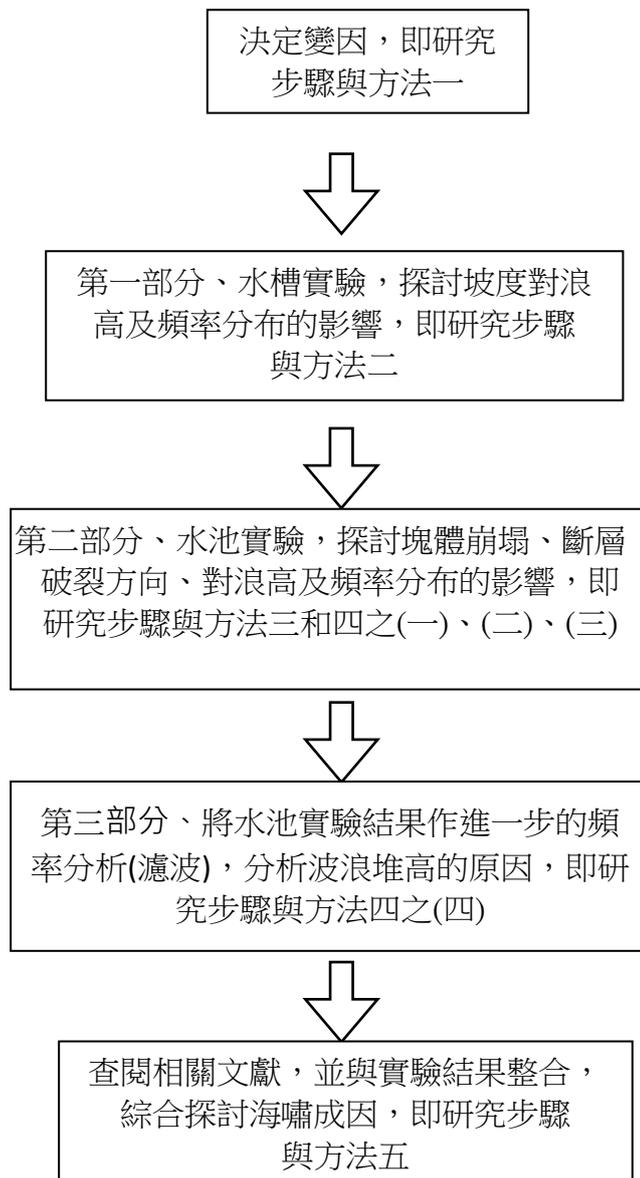
引起海嘯的因素主要是海底斷層發生垂直錯移，斷層錯移時會在海面產生一個波長百公里，波高數十公分的長浪，波長超過水深的 20 倍，波速 $v = \sqrt{gh}$ ， h 為水深。這個浪在遠洋傳遞時，因水深沒變化，所以波浪等速傳遞，波形無明顯變化；進入淺水區時，深度變淺而速度變慢，波長變短使波高變大造成海嘯，我們布置水槽底部，讓水波從深水區傳到淺水區，模擬海嘯。斷層的垂直錯動為海嘯生成的初始必要條件，2018 年的 Palu 海嘯事件卻來自於一個垂直錯動位移很小的斷層，所以造成這次海嘯事件，應該有除了斷層垂直位移以外的其他因素，詳述如下：



- (一)圖四(左)為 Palu 海灣附近的主震、餘震之震央分布；圖五(右)為引起主震之斷層機制解，由斷層機制解可以看出該斷層滑移方向為北偏西 10 度之南北走向，和海灣的走向十分接近，考慮和斷層面垂直的輔助面，所以我們在池塘操作實驗時，用兩組互相垂直的方向產生擾動，模擬不同的斷層滑移方向。



- (二)我們查閱了 Palu 海嘯相關的研究，有些學者認為地震同時引起塊體崩落(landslide)導致海嘯，因此我們在池塘實驗時，用重物(捆綁 4 塊磚頭)貼著水面自由墜落，模擬塊體崩落。
- (三)根據淺水波的公式波速 $v = \sqrt{gh}$ ，水深 13~35 公分，我們在水池製造適當頻率的擾動，就可以產生波長 1.5 公尺以上的水波，符合淺水波(波長 > 20 倍水深)的條件。
- (四)綜合海嘯的理論，以及查閱文獻的結果，我們設計以下的實驗流程，探討 2018 年 Palu 海嘯的原因。



二、水槽實驗方法--探討海底地形坡度對浪高和頻率分布影響

(一)我們先把水槽蓄滿 13 公分深的水，用手平推木板製造水波，錄製的水波行進影片，經由 Tracker 分析軟體計算出水波波速大致為 1.26~1.33 公尺/秒

(二)波長至少水深的 20 倍，即 $13 \times 20 = 260$ 公分 = 2.6 公尺，才符合海嘯屬於淺水波的條件，藉由波速公式 $v=f \lambda$ ， $1.33=2.6 \times f$ ，頻率 f 最多 0.51Hz，即水波週期至少 1.96 秒。

(三)為了讓淺水波的特性更明顯，我們將推動木板的方式為 3 秒推去、3 秒拉回，製造週期 6 秒的水波，模擬海嘯。

$1.26=(1/6) \times \lambda$ ， $\lambda = 7.56(\text{m})$ ； $1.33=(1/6) \times \lambda$ ， $\lambda = 7.98(\text{m})$ ，波長皆大於水深 20 倍，符合淺水波之條件。

(四)我們在水槽底部放置障礙物製造不同坡度地形，透過錄影觀察以及用 Arduino 電路板連接超音波感測器測水波通過之水位變化，將超音波感測器紀錄的水位變化換算成波高，再將波高隨時間的訊號作傅立葉頻譜分析，我們布置的坡度有以下兩種，各操作了 3 次實驗：

1. 垂直陡坡：

將石板放在水槽底部模擬陡坡，用方法二之(三)平推木板製造水波，水面上方放置兩個超音波感測器，分別置於石板兩端對應的水面上方，兩個超音波感測器測量之數據可以反映水波通過陡坡前後之水位變化，並將波高隨時間變化的訊號作傅立葉頻譜分析，模擬地震後海水遇上海底的陡坡對波浪堆高及頻率分布的影響。



[圖六(左)、七(右)] 垂直陡坡的實驗裝置

2. 約 30 度緩坡：

將自製的斜坡與石板放在水槽內並用相同方式平推木板，和上述相同的方式放置兩個超音波感測器，則兩個超音波感測器測量之數據可以反映水波”爬”過緩坡前後之水位變化，並將波高隨時間變化的訊號作傅立葉頻譜分析，模擬地震後海水遇上海底的緩坡對波浪堆高及頻率分布的影響。



[圖八(左)、九(右)] 緩坡的實驗裝置。

圖八為原先的擺設因平台太短無法觀測出明顯的波於是將爬升平台延長如圖九。

三、水池實驗方法--探討海底塊體崩塌對浪高和頻率分布的影響

利用數塊磚頭製作重物並用繩子綁住使其貼著水面，自由墜落進水池中製造水波模擬塊體崩塌，將兩個超音波接收器放置在池塘不同位置，兩個接收器相隔 20 公分，記錄重物墜落後水位變化，將水位換算成波高，將波高隨時間變化的訊號作傅立葉頻譜分析。



[圖十] 模擬海底崩塌的重物。

四、水池實驗方法--探討斷層破裂方向對浪高和頻率分布的影響

這個步驟的實驗，**控制變因**是擾動造波的強度，將磚頭用粗棉繩網綁，懸吊在支架上，將磚塊由固定高度像單擺一樣自由釋放，磚塊擺到最低點時，位能轉換為動能，撞擊自製起波器產生波浪(圖十，圖十一)。由於起波器之長方形塑膠板推動水波時會因水阻而彎曲形變，形狀回復時對水體產生反向的施力，塑膠板從前推到形變回復的時間約 1~1.5 秒鐘，水池的深度 13~35 公分，利用方法二的方式估算，這樣造出的波長接近淺水波的條件。由於磚塊由固定高度釋放，每次造波的強度可以固定，**操作變因**是擾動方向與池塘淺灣走向的夾角，我們用兩種不同的擾動方向來進行實驗，將超音波感應器紀錄的水位換算成波高，再將波高隨時間變化的訊號作傅立葉頻譜分析。

:

(一)、擾動方向與池塘淺灣走向接近平行：

布置如圖十一，圖十二所示撞擊起波，模擬斷層破裂滑移方向和 Palu 海灣走向平行，用 2 個不同位置的超音波感測器記錄水位變化，分別將水池自然擾動水位隨時間變化、主訊水位隨時間變化做快速傅立葉轉換(FFT)，分析水池訊號的自然頻率分布、主訊水位的頻率分布。

。



[圖十一(左)、十二(右)]當斷層破裂與海灣平行時的實驗裝置。

(二)、擾動方向與池塘淺灣走向接近垂直：

將起波器擺至水池內(如圖十三、圖十四)，撞擊起波模擬斷層破裂滑移方向和 Palu 海灣走向垂直，用 2 個不同位置的超音波感測器記錄水位變化，分別將水池自然擾動水位隨時間變化、主訊水位隨時間變化做快速傅立葉轉換(FFT)，分析水池訊號的自然頻率分布、主訊水位的頻率分布。



[圖十三(左)、十四(右)] 當斷層破裂與海灣垂直時的實驗裝置

(三)比較不同方向擾動的水位變化：將同一個接收器記錄之不同擾動方向(平行、垂直)的水位變化做比較，找出水波傳遞方向和振幅變化的關係。

(四)過濾雜訊之傅立葉頻譜分析：

為了清楚分別實驗數據中的雜訊，以上實驗之水位變化，除了用傅立葉轉換分析訊號的頻率分布，我們再用兩種濾波方法處理實驗數據，詳述如下：

1.方法一：將較強之自然訊號去除：

實驗地點的水池，由於風吹、水池本身的邊界條件等因素，本身也會自然擾動而產生水位變化的訊號，此方法可將最大的自然訊號去除，得到比較沒有背景訊號干擾、較「乾淨」的主要訊號，操作步驟如下：

- (1) 分別將水池自然擾動水位隨時間變化、主訊號水位隨時間變化做快速傅立葉轉換(FFT)，得到水池訊號的自然頻率與強度分布、主訊號的頻率與強度分布。
- (2) 從水池訊號的自然擾動頻率分布中，找出強度最大的頻率 f_1 、 f_2 ……
- (3) 從主訊號的頻率分布中，將 f_1 、 f_2 ……等強度資料刪除(強度設為 0)，其餘資料為刪除水池自然擾動影響後的主訊號。
- (4) 將(3)之資料做快速反傅立葉轉換(IFFT)，轉回時間域，得到的是較不受水池自然擾動影響的主訊號。

2.方法二、將高頻訊號去除：

由於我們自製的起波器，造波週期約 1~1.5 秒，所以主要訊號的頻率約 0.6~1Hz，因此將 1Hz 以上訊號的強度去除(強度設為 0)，剩下的為低頻的主訊號，用此方法可將複雜的訊號簡化，較容易分析訊號的變化，操作步驟如下：

- (1) 從實驗得到之水位變化一時間關係圖中，選取震幅明顯變大的主要訊號，做快速傅立葉轉換(FFT)到頻率域中。
- (2)將頻率 1Hz 以上的訊號強度去除後，再快速反傅立葉轉換(IFFT)回到時間域中，得到的就是較低頻的主訊號。

五、由實驗結果探討 Palu 海嘯成因：

我們上網查閱的資料如下

- (一)2018 年蘇維埃西島強震的主震及餘震之發生時間、震央位置、規模與深度。
- (二)2018 年蘇維埃西島強震的主震之斷層面解、Palu 海灣空拍圖、海水等深圖。
- (三)Palu 海灣內部各測站測得之海嘯浪高。

將我們實驗模擬的結果，參照以上查閱的資料，探討除了斷層垂直位移、塊體崩塌，引起 Palu 海嘯的其他可能因素。

伍、研究結果與討論

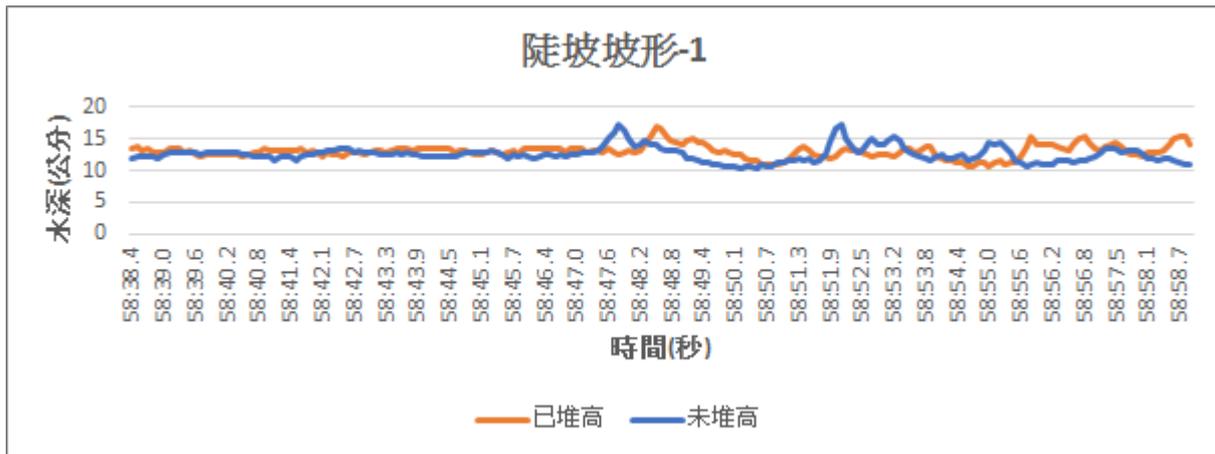
- 一、不論是水槽實驗或是水池實驗，超音波感測器是根據超音波往返水面到感測器之間的時間換算成距離(d)，我們再用簡單的換算，得到相對波高。超音波感測器本身有不穩定的雜訊，而且水波的反射訊號也會使記錄到的數據變得複雜，水槽實驗數據的水位變化我們只讀取第一個訊號(初達波)做討論；水池實驗的數據會用濾波的方式將訊號簡化。

二、水槽實驗結果--探討海底地形坡度對浪高影響

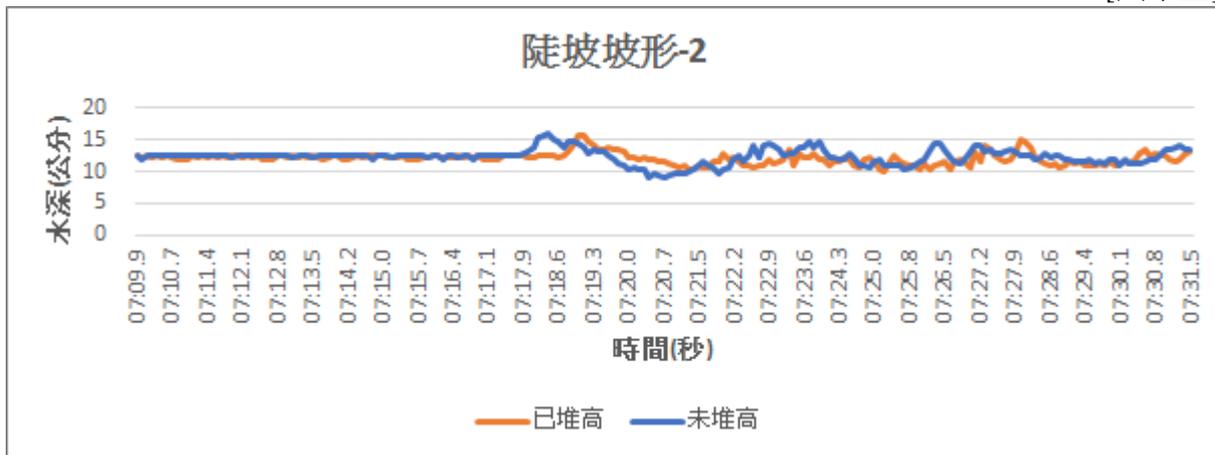
(一)垂直陡坡：

1.下圖分別是 3 次實驗的波高隨時間變化，藍色曲線是還沒通過陡坡前的訊號，紅色曲線是通過陡坡後的訊號，陡坡使水深變淺應該會導致波浪堆高，但從下圖中 3 次實驗的結果，第二個感測器測到的水位(紅色曲線)並沒明顯堆高，錄影的影像中也看不出水位堆高的現象。水深變淺後水體沒有堆高，可見能量衰減很多，我們放置的石板形成了一個不連續的邊界，水波傳遞時遇上不連續邊界容易反射，許多能量反射導致結果呈現振幅衰減的現象。

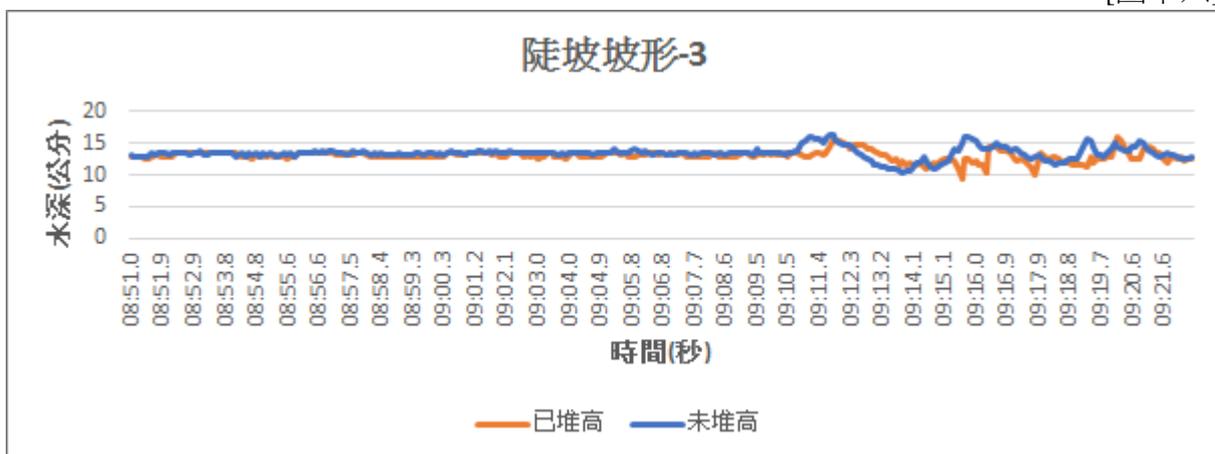
[圖十五、十六、十七]



[圖十五]

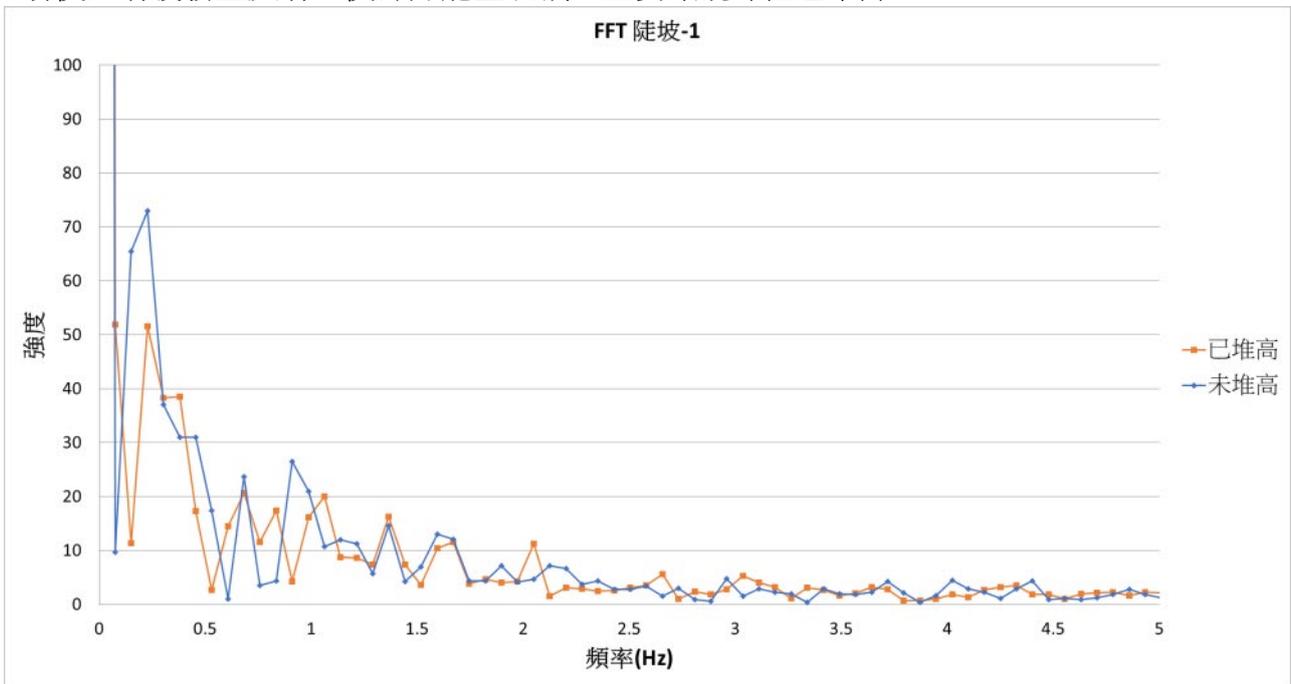


[圖十六]

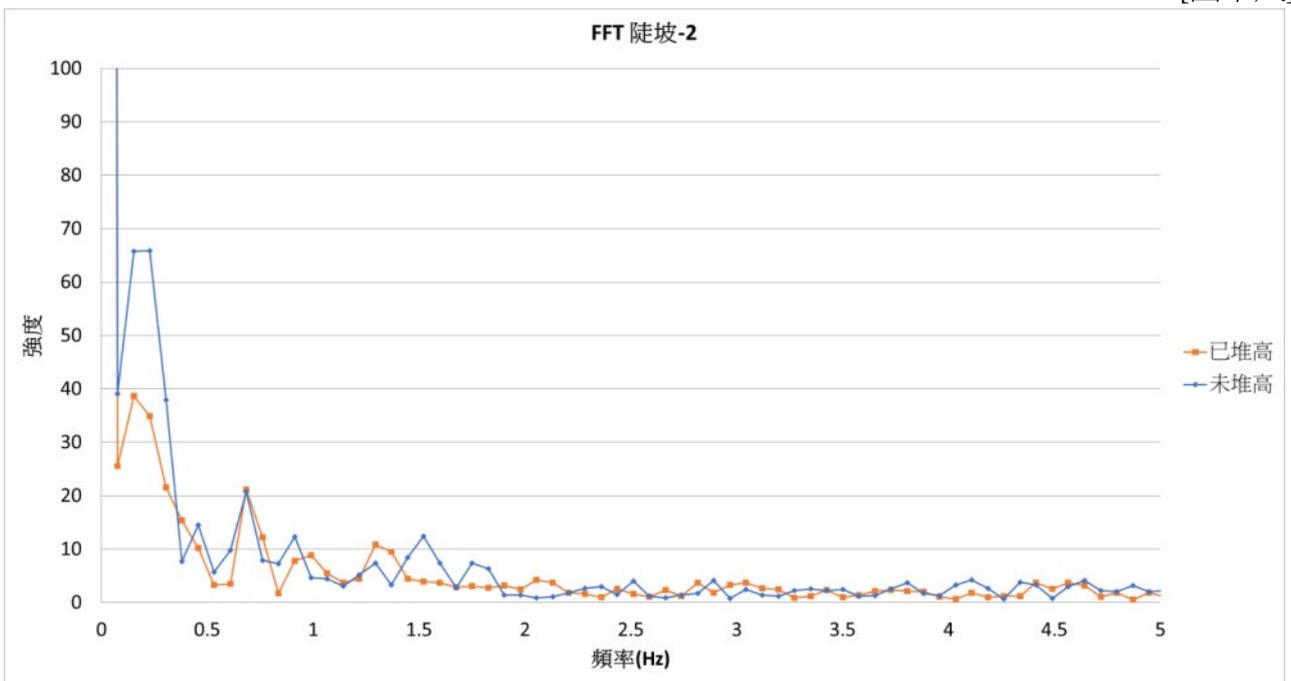


[圖十七]

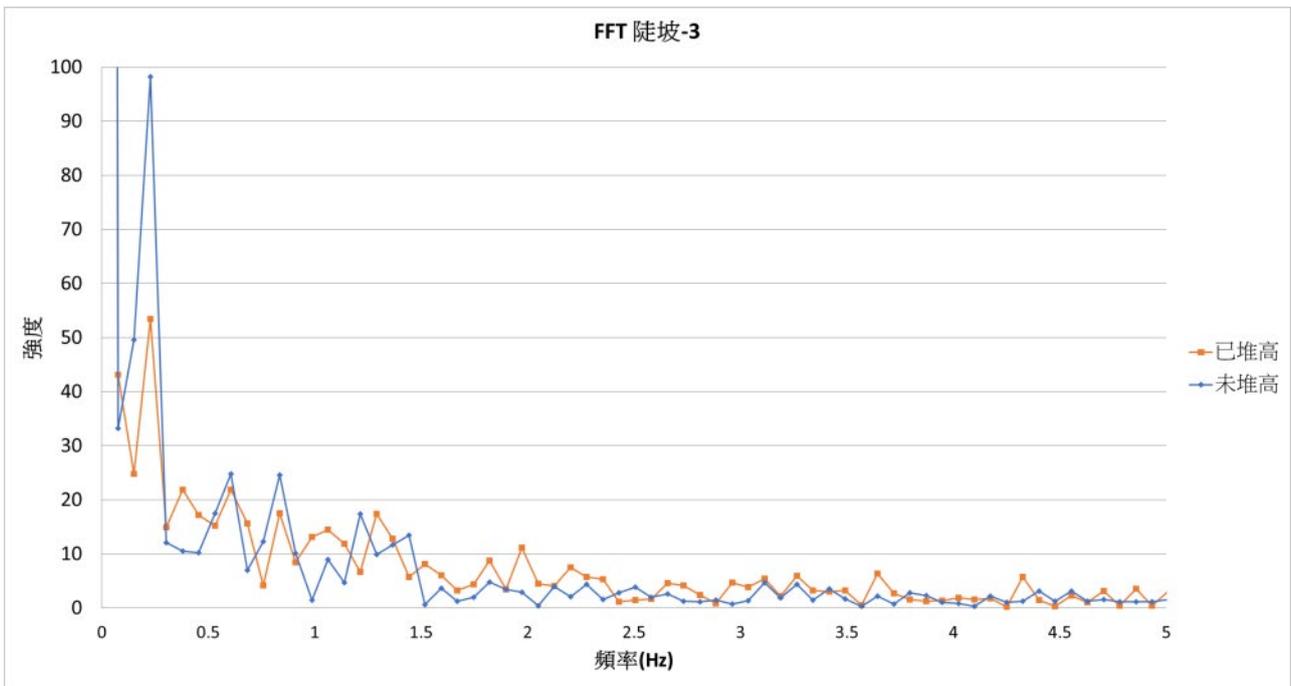
2.我們將初達波(即上圖中較明顯的訊號)附近的資料，作傅立葉頻譜分析(FFT)，結果如下，從下圖頻譜分布圖中，我們可以看到在 0.2Hz 有一個峰值，實驗中我們產生的波源為周期 6 秒的波，所以頻率 1/6Hz 附近才是主要的訊號，以下 3 張圖中都呈現，經過陡坡後的訊號(紅色)，在頻率 1/6Hz 的峰值強度，相較原來強度(藍色)明顯衰減。由頻譜分析結果，陡坡易使入射波發生反射，使部分能量衰減，主要訊號峰值也下降。



[圖十八]



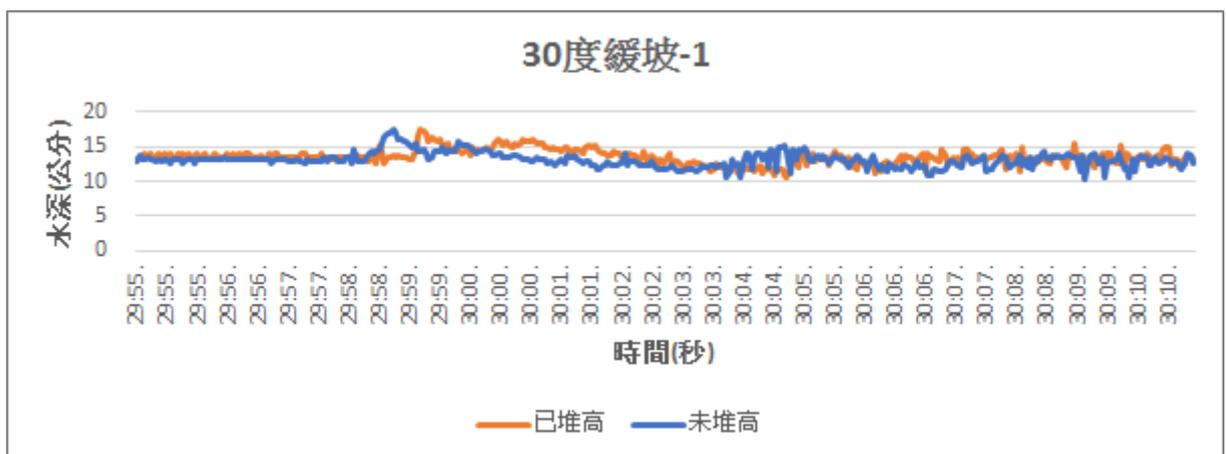
[圖十九]



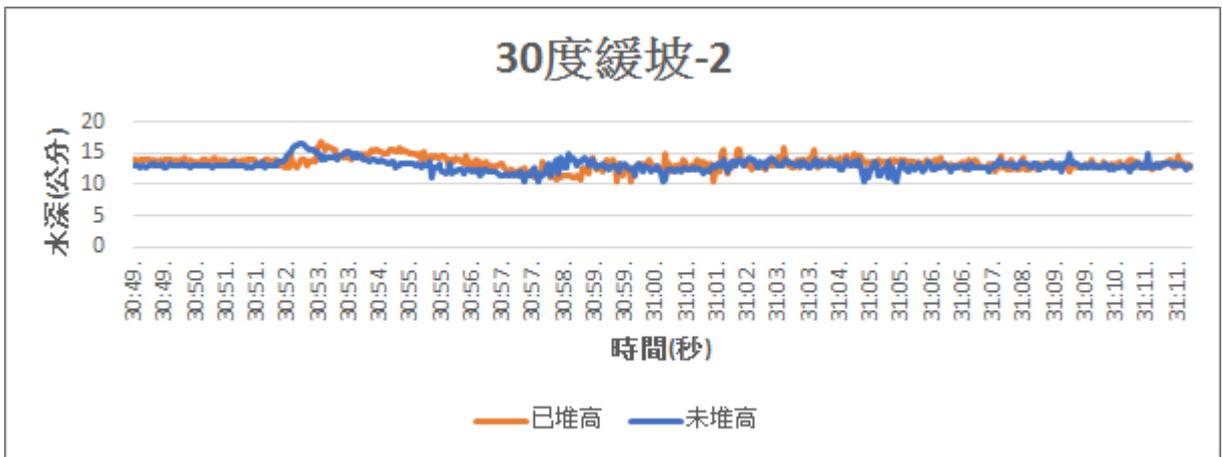
[圖二十]

(二)約 30 度緩坡：

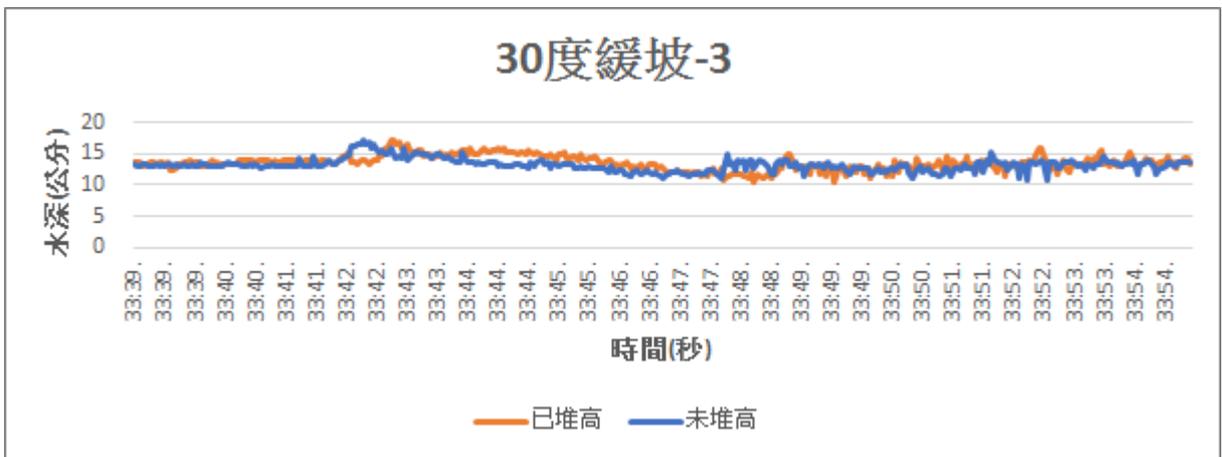
1. 下圖是 3 次實驗的結果，藍色曲線是還沒通過緩坡坡前的訊號，紅色曲線是通過緩坡後的訊號，從下圖中 3 次實驗的結果，第二個感測器測到的水位(紅色曲線)相較於第一個感測器測到的水位(藍色曲線)沒有明顯變化，雖然測量之水位堆高不明顯，但錄影的影像中可看到水位堆高的現象，可能是水波的波長太長，感測器的格點不夠密，所以解析度不足測不到波堆高的數據。我們認為波沿著地形緩緩爬升，整個地形的變化是連續的，反射的能量較少，大部分能量可以通過，達到波由深水區進入淺水區，水深漸淺速度漸慢，頻率不變波長變短，波漸漸堆高的效果，所以錄影的影像可以看到波浪大約堆高 1 公分。



[圖二十一]

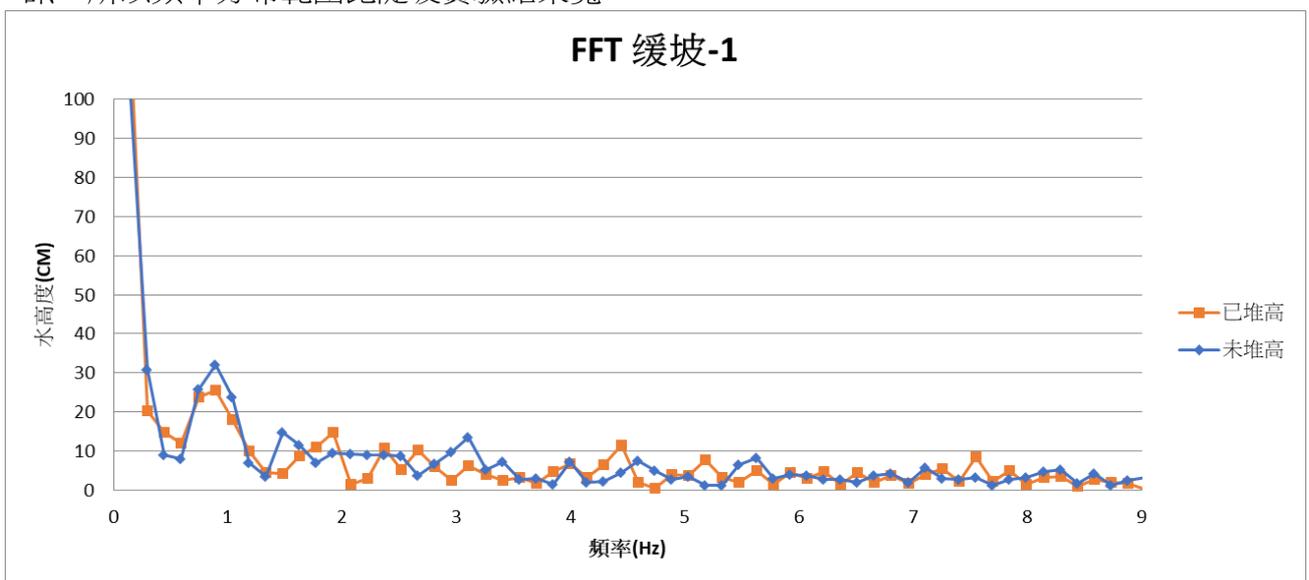


[圖二十二]

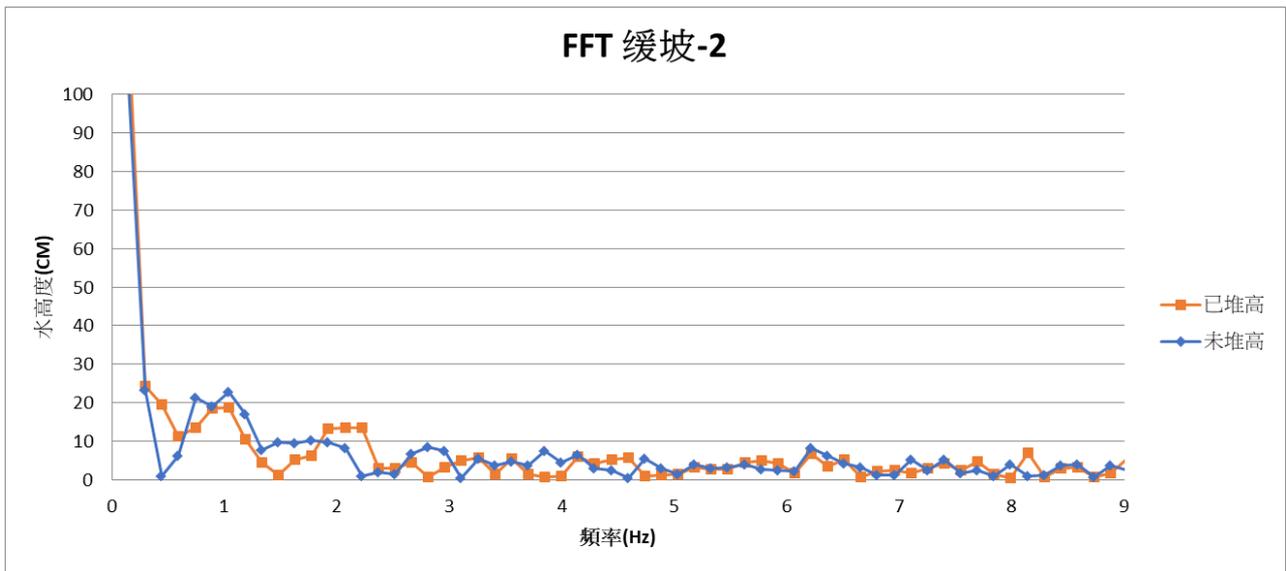


[圖二十三]

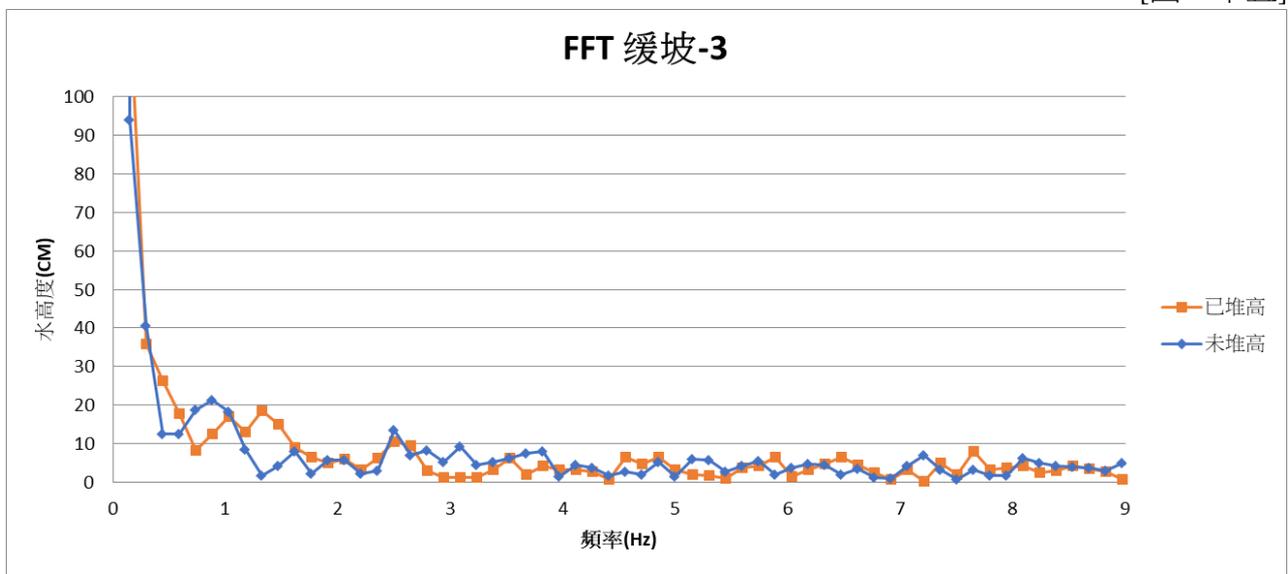
2.我們將初達波(即上圖中較明顯的訊號)附近的資料，作傅立葉頻譜分析，結果如下，主訊號在 0.2Hz 附近，整個頻率分布範圍(頻寬)是陡坡實驗的 2 倍；而堆高後頻率 0.2Hz 峰值並不像陡坡實驗中有衰減的現象。愈多邊界擾動會產生愈多高頻訊號，緩坡使波慢慢堆高，由於堆積的時間變長，遇水槽邊界的反射訊號和原來的人射波合成後，產生更多的高頻雜訊，所以頻率分布範圍比陡坡實驗結果寬。



{圖二十四}



[圖二十五]



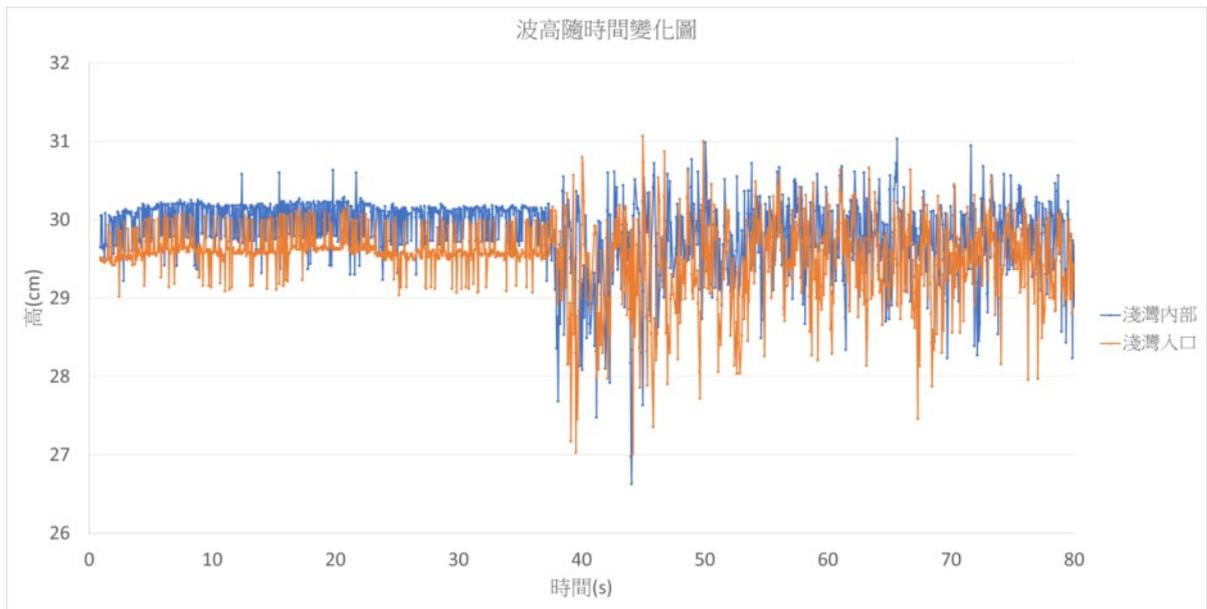
[圖二十六]

(三)由這項水槽實驗結果得知，垂直錯移量不大的斷層，雖然引起初始振幅不大的浪，若遇低角度的緩坡，主要訊號的強度不易衰減，較易使波浪堆高；陡坡容易使水波反射，主要訊號的強度容易衰減，整體水位較不易堆高。

三、水池實驗結果--探討海底塊體崩塌對浪高的影響

(一)圖二十七是我們將重物貼著水面自由墜落的實驗結果：圖中兩條曲線分別是不同的位置的感測器紀錄到的水位變化，圖中呈現的是重物墜落後水位升高持續的擾動。

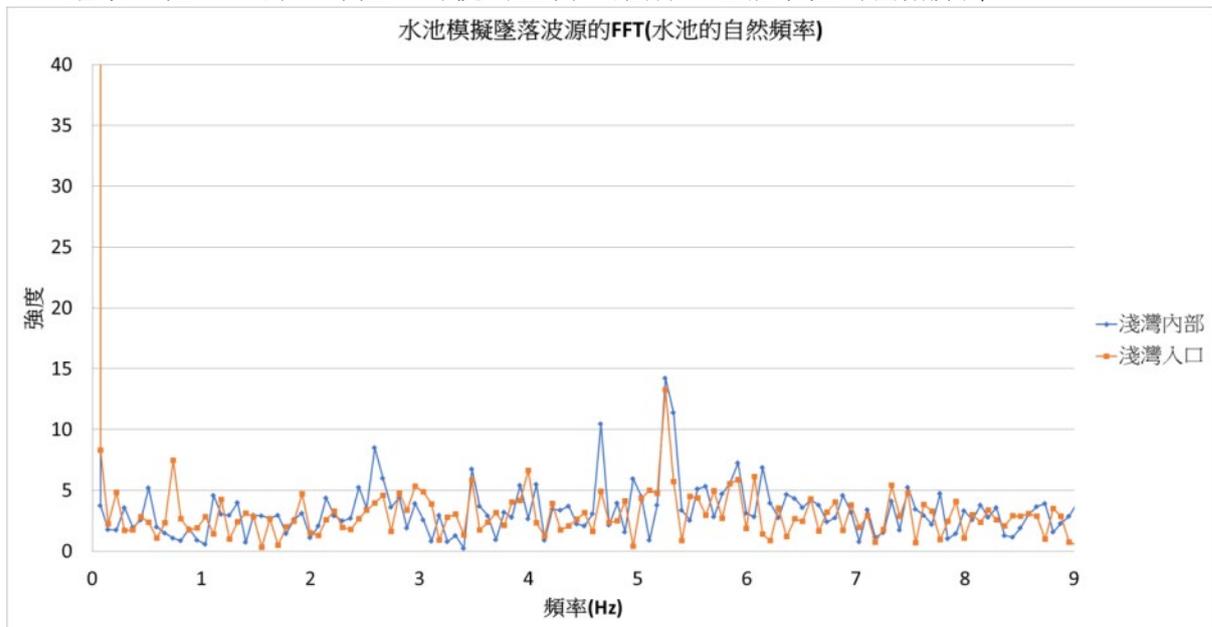
操作水池實驗時，因為持續的陣風以及水生生物的活動，產生許多不可避免的雜訊，所以，我們將主訊號前的背景水位和主訊號到達後的水位變化分別作 FFT，才能比對出因池塘形狀及風吹等因素造成的背景自然頻率，找出我們模擬海嘯的主訊號頻率。



[圖二十七]

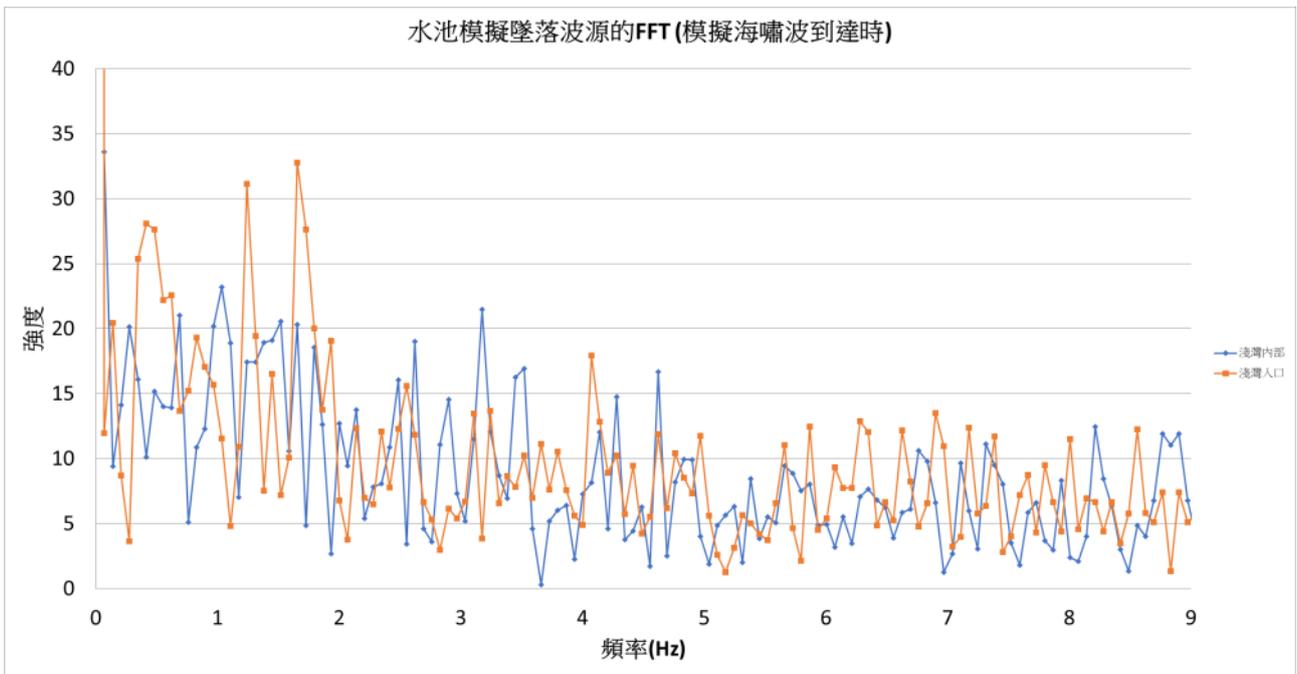
(二)FFT 頻譜分析：

- 1.水池自然頻率的 FFT：下圖是兩個超音波感測器紀錄的水位變化經 FFT 頻譜分析的結果，在 5Hz 有一峰值，可視為重物墜落前，池塘水位的自然頻率。



[圖二十八]

- 2.主訊號之後的 FFT：下圖是兩個超音波感測器紀錄的重物墜落水面後之水位變化，經 FFT 頻譜分析的結果，紅色曲線是較靠近墜落點的訊號；藍色曲線是較遠離墜落點的訊號，由於重物墜落產生擾動經歷的時間約 0.8~1 秒鐘，所以主要訊號會在頻率 1Hz~1.25Hz 附近。圖中兩個感測器的訊號在 1~1.25 Hz 附近均出現峰值，但兩條曲線峰值的對應頻率並不一致，墜落的擾動方式較接近點波源，水波往各個方向傳遞，兩個感測器收到的是來自不同方向的訊號，所以頻譜分析後峰值的對應頻率不一致。點波源的能量傳遞方式會使能量分散，**如果某個頻率的訊號為造成災情的海嘯，但往特定方向傳遞的能量只佔擾動源的小部分，也只會影響局部的地點。**

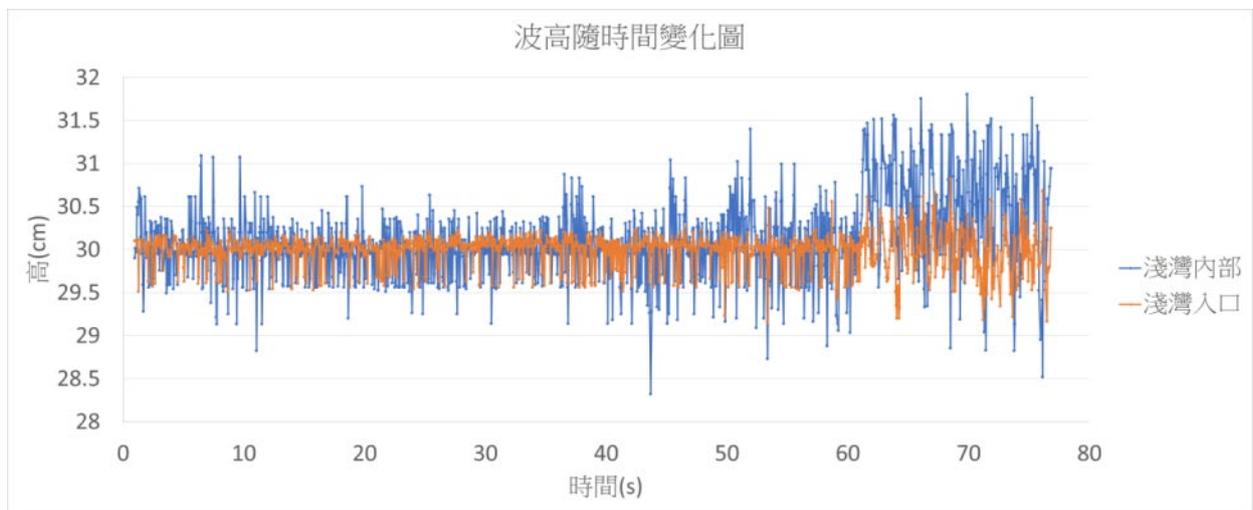


[圖二十九]

四、水池實驗結果--探討斷層破裂方向對浪高的影響

(一)波源入射方向和池塘淺灣方向平行：

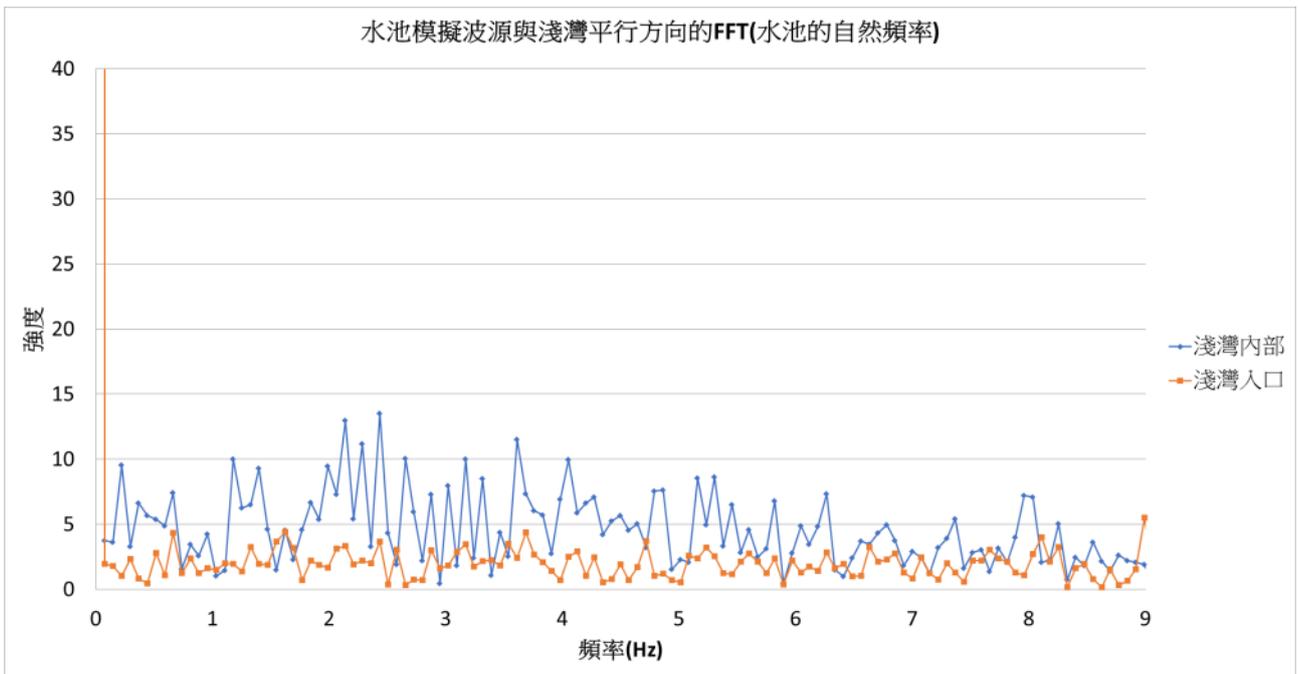
1.圖中兩條曲線分別是不同位置的感測器紀錄到的水位變化，紅色是放置淺灣入口接收器紀錄的水位變化，藍色是放置淺灣內部接收器紀錄的水位變化，圖中可見藍色訊號明顯大於紅色，淺灣形狀為入口較寬、內部較窄的漏斗形，水波入射淺灣後因面積變小而堆高。



[圖三十]

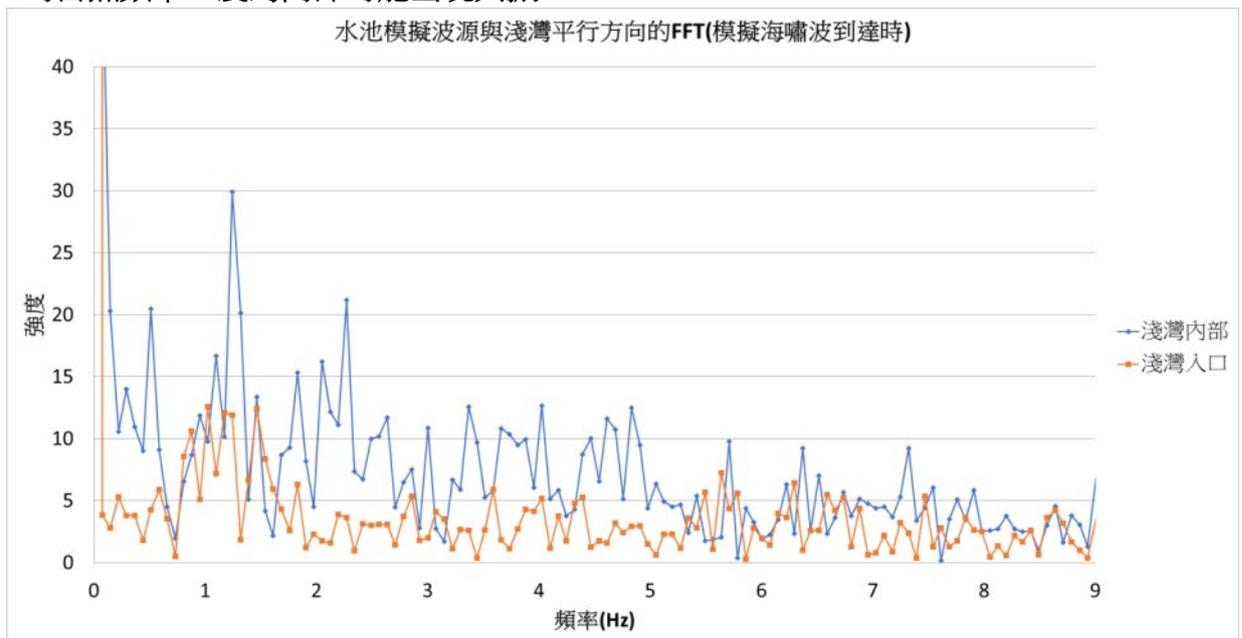
2. FFT 頻譜分析：

(1)水池自然頻率的 FFT：下圖是兩個超音波感測器紀錄的水位變化經 FFT 頻譜分析的結果，峰值分布在 0.6Hz，1.2Hz，2.4Hz 附近，這三個頻率可視為製造波源前，池塘淺灣水位的自然頻率。



[圖三十一]

(2)主訊號之後的 FFT：下圖是兩個超音波感測器紀錄的主訊號經過之水位變化，經 FFT 頻譜分析的結果，紅色曲線是淺灣入口處的訊號；藍色曲線是淺灣內部的訊號，從頻率分析看來，波傳至淺灣內部各頻率的訊號皆增強。我們自製起波器產生擾動經歷的時間約 1~1.5 秒鐘，所以主要訊號會在頻率 0.6Hz~1Hz 附近。圖中兩個感測器相距 35 公分，兩者的訊號均在 0.6Hz，1.2Hz，2.4Hz 附近均出現峰值，且兩條曲線峰值的對應頻率相當一致，和上圖淺灣自然頻率峰值比對，這三個峰值的頻率(0.6Hz，1.2Hz，2.4Hz)完全符合淺灣的自然頻率。這個結果可以呈現，淺灣內部接收器記錄的水位變化較淺灣外側接收器記錄的大，除了淺灣入口由寬變窄使水位堆高，還有可能是以下因素：當波源入射方向和池塘淺灣方向平行，水波傳入淺灣時，主訊號的頻率接近淺灣的自然頻率，淺灣內部可能出現共振。



[圖三十二]

(二) 波源入射方向和池塘淺灣方向垂直：

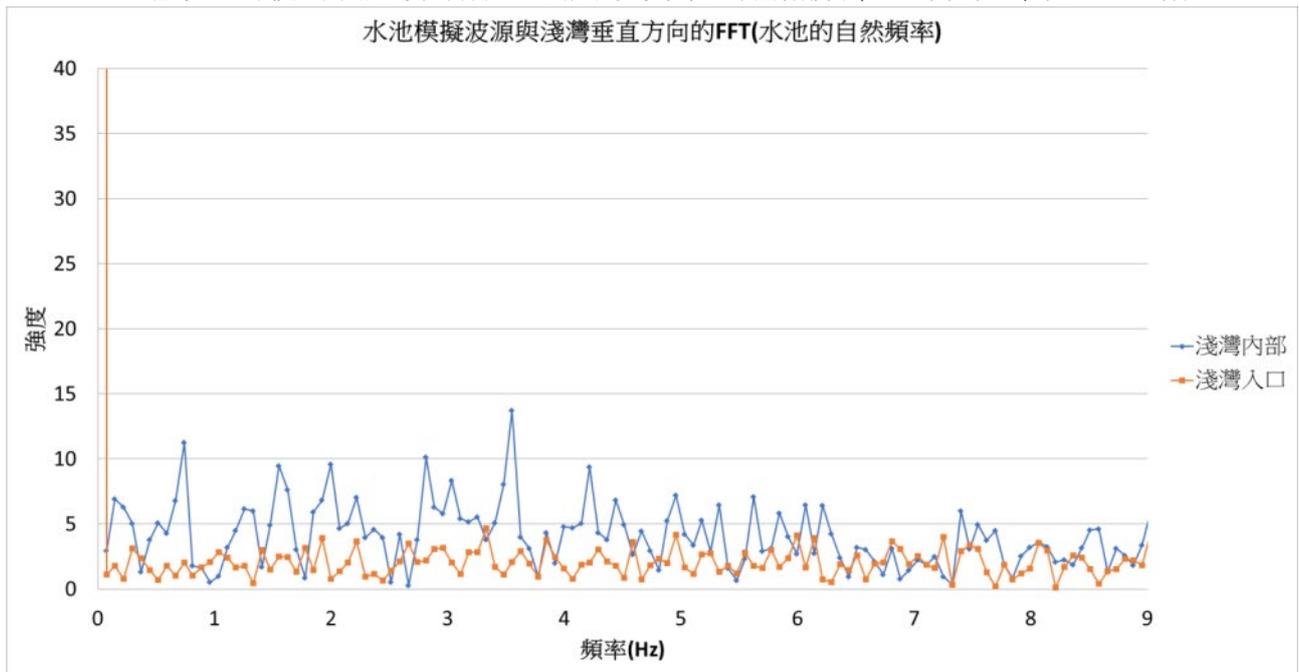
1. 圖中兩條曲線分別是不同的感測器紀錄到的水位變化，紅色是放置淺灣入口接收器紀錄的水位變化，藍色是放置淺灣內部接收器紀錄的水位變化，圖中可見藍色訊號仍大於紅色。因波源擾動方向和淺灣方向接近垂直，沿著漏斗形淺灣入口繞射進來的水波，因面積變小而堆高。



[圖三十三]

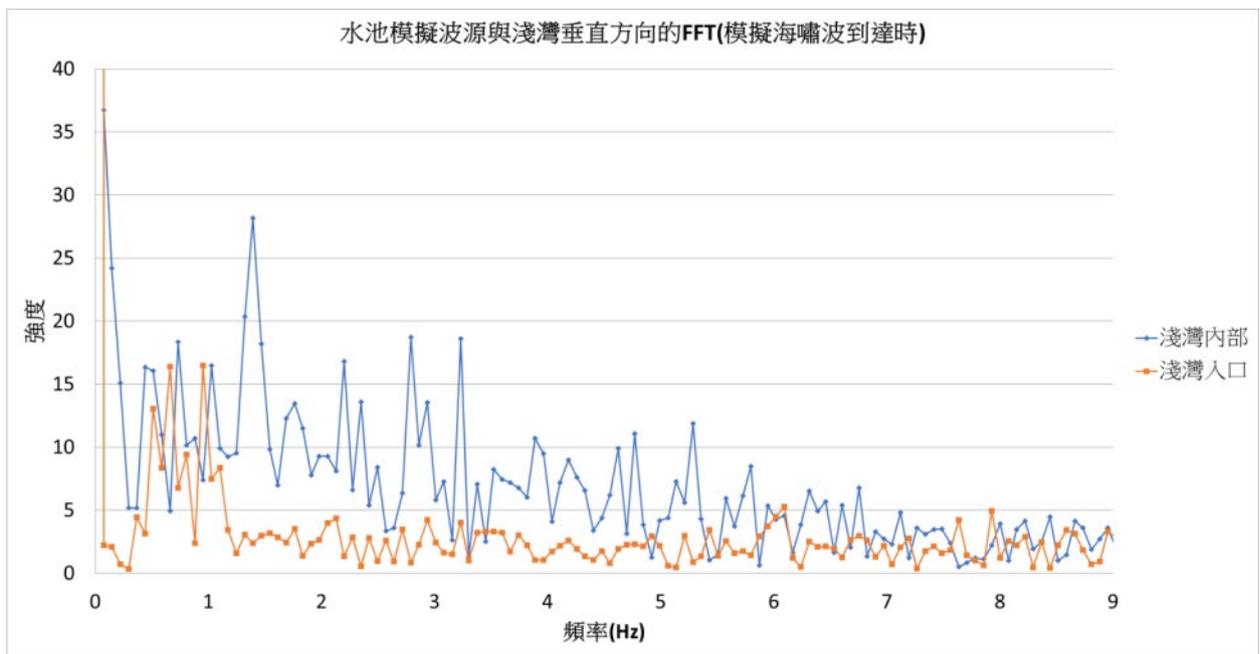
2. FFT 頻譜分析：

(1) 水池自然頻率的 FFT：下圖是兩個超音波感測器紀錄的水位變化經 FFT 頻譜分析的結果，可視為製造波源前，池塘淺灣水位的自然頻率，峰值分布在 3.5Hz 附近。



[圖三十四]

(2) 主訊號之 FFT：下圖是兩個超音波感測器紀錄的主訊號經過之水位變化，經 FFT 頻譜分析的結果，紅色曲線是淺灣入口處的訊號；藍色曲線是淺灣內部的訊號，和上面平行入射的結果一樣，波傳至淺灣內部各頻率的訊號皆增強。但兩個感測器出現峰值的對應頻率並不一致：紅色訊號峰值對應的頻率，較接近我們自製起波器產生擾動頻 0.6Hz~1Hz 附近，藍色訊號峰值對應的頻率，主要落在 1.5Hz，但是在 0.5~1Hz 之間，有些次要訊號的峰值是對應的。和結果四之(一)一樣，當波源入射方向和池塘淺灣方向垂直，水波繞射入淺灣時，若產生特定訊號的頻率，也有機會引起共振。



[圖三十五]

(三)比較不同方向擾動的水位變化：

由上述實驗結果得知，不論是造波方向和淺灣平行或垂直，都有可能和淺灣產生共振。下圖是造波擾動方向平行池塘淺灣走向(紅線)、造波擾動方向垂直池塘淺灣走向(藍線)，淺灣最內側(最遠離擾動源)的感測器記錄到的水位變化。因為平行海灣實驗的震源與垂直海灣實驗的震源到 sensor 的距離不相同，前者的距離大約為 300 公分，後者大約為 250 公分，因此我們將得到的所有資料作距離校正，依據振幅和距離平方成反比進行比例換算，以下比較兩個不同造波方向的水位變化。

由下圖結果可以看出：

- 1.兩者訊號振幅皆衰減後再度增加且持續一段時間，因為感測器放置的位置是離波源最遠的淺灣端點，水波由較寬水域進入狹窄淺灣之後，除了水深變淺波高變高，還有水體堆積、端點反射波和持續湧入的水波產生干涉等效應。



[圖三十六]

- 2.破裂方向平行淺灣的水波振幅(紅線)明顯大於破裂方向垂直淺灣的水波振幅，當能量沿著淺灣方向入射，相較於其他方向，能量較易集中，使水位容易堆高。

(四)濾波－快速傅立葉分析(FFT)與快速反傅立葉分析(IFFT)：

由以上實驗四之(三)的結果，當水波入射方向和淺灣方向平行，淺灣內部的水位堆高較明顯；由實驗四之(一)、(二)的結果，當主訊號的頻率和淺灣本身的自然頻率一致，有可能產生共振，使振幅變大。實驗時接收器之位置，是池塘裡面積較窄小的淺灣，在沒有造波擾動的情況下，也有微弱的自然擾動的訊號，考慮淺灣的寬窄及自然擾動的效應，以下三種條件都可能使振幅放大：

條件 1.共振效應(resonant)：水波主訊號頻率與淺灣自然頻率相同，且兩者無相位差，引起共振效應。

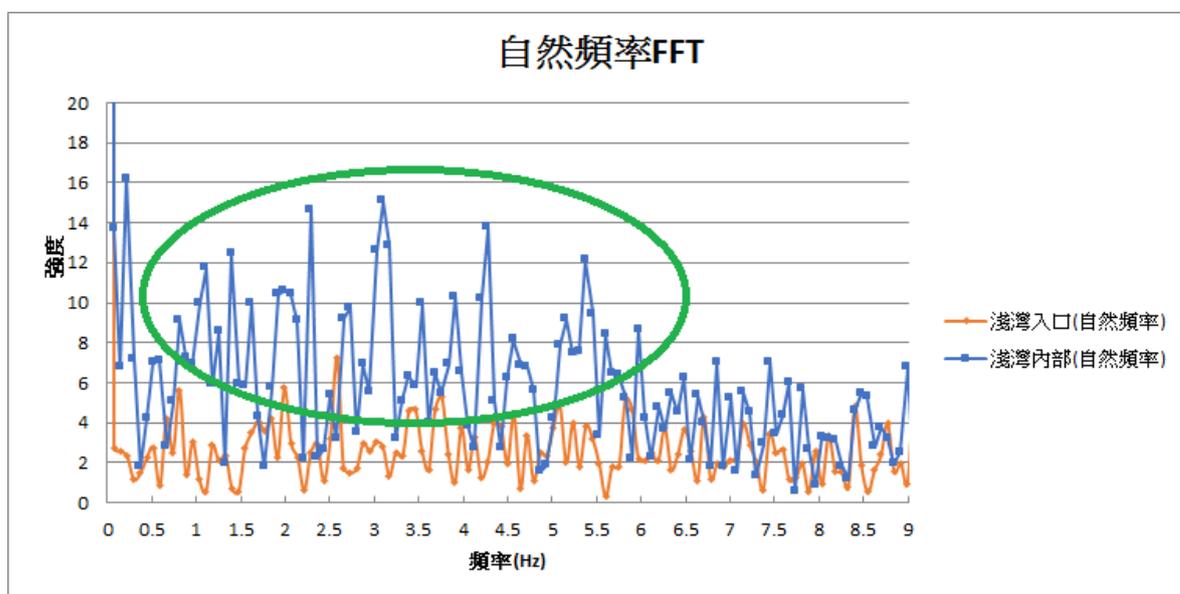
條件 2. 耦合共振(resonant inductive coupling)：水波主訊號頻率與海灣自然頻率相同，但兩者有時間相位差，當主訊號持續時間很長，相位差逐漸變小而產生共振。

條件 3.邊界效應(boundary effect)：入射水波撞到淺灣邊界產生反射波，與持續進入淺灣的入射波形成駐波使振幅變大；或是多個反射波彼此干涉，在淺灣的某些特定位置建設性干涉使振幅變大。

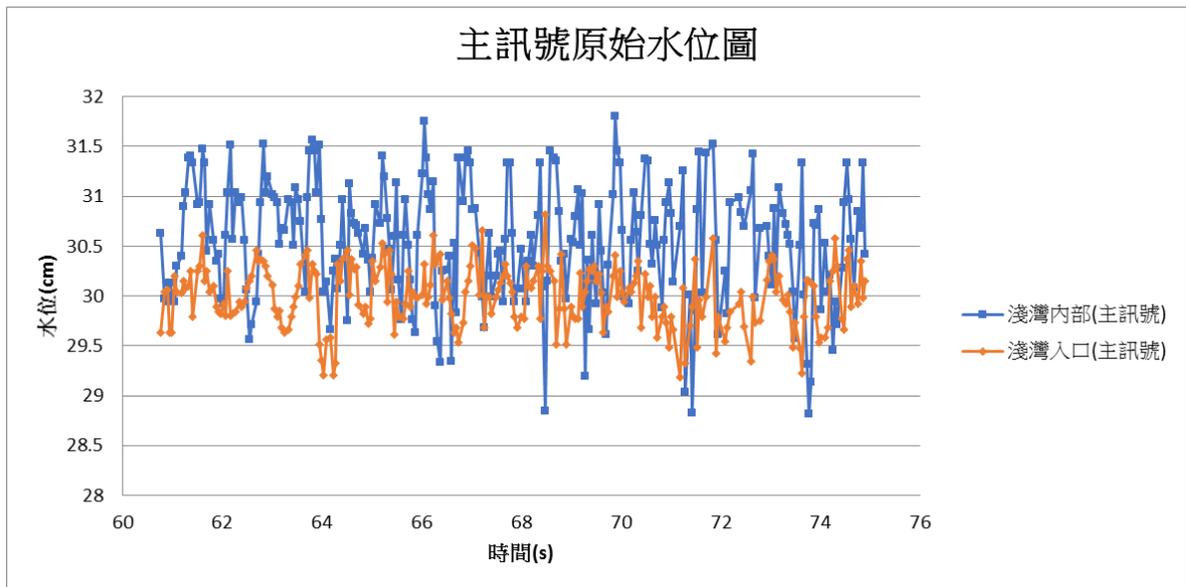
因此，我們用濾波的方式處理資料，探討池塘實驗中淺灣內部水位堆高的原因，是否發生共振(條件 1)或其他條件，進而探討 Palu 海嘯的可能因素，以下是採用兩種濾波方式處理後的結果：

1.方法一：濾波之結果

(1)圖三十七為實驗四之(一)為水波自然擾動的頻率，我們將其視為自然頻率。綠色圈選處為自然頻率中強度較強的訊號，找出強度 8 以上對應的頻率(不只一種頻率)，這些頻率在主訊號的頻率域中會被濾掉。

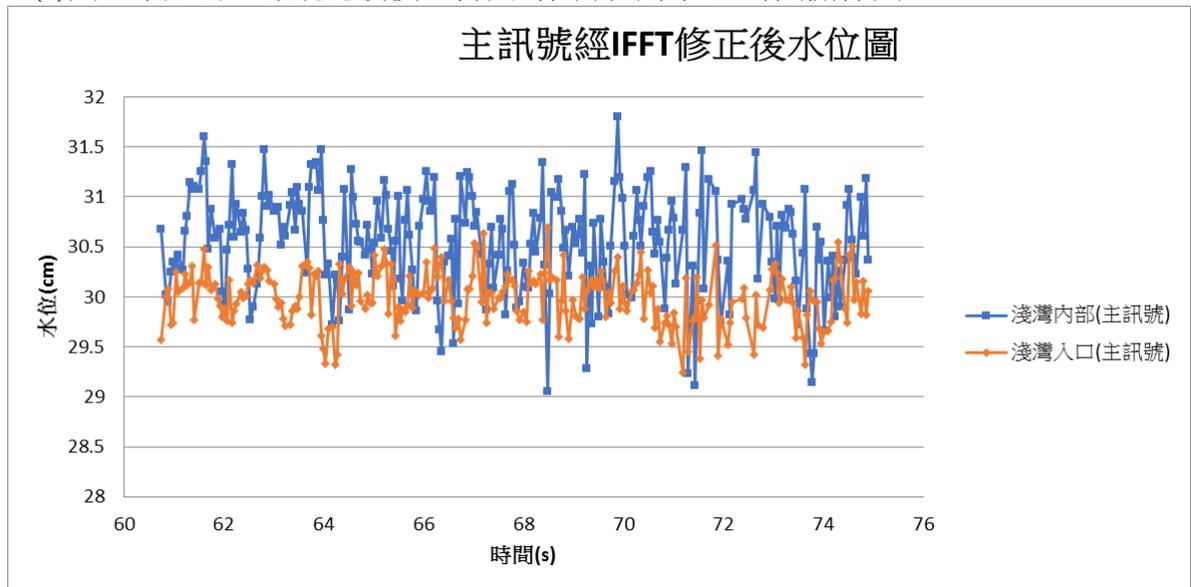


[圖三十七]



[圖三十八]

(2)圖三十九為主訊號濾波後，轉回時間域的水位—時間關係圖

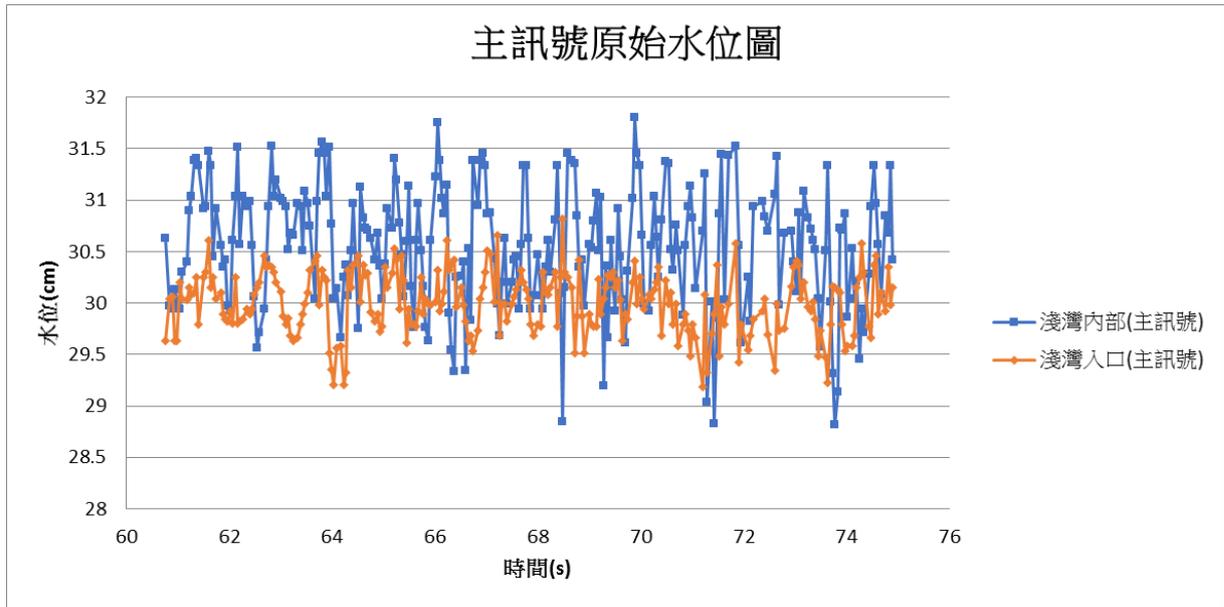


[圖三十九]

由以上濾波前與濾波後的水位變化圖，可以看出經過濾波後水位變化圖(圖三十九)的曲線相較濾波前(圖三十八)並沒有明顯變化。原始主訊號濾掉較強自然頻率訊號，即為修正後之主訊號，水位沒有明顯改變，表示自然訊號太弱，對主訊號並沒有太大的影響，因此我們前述推論水位變高的三種條件中，第一種和第二種都和自然頻率有關，所以這兩種條件都不是實驗四之(一)水位堆高的主要原因。

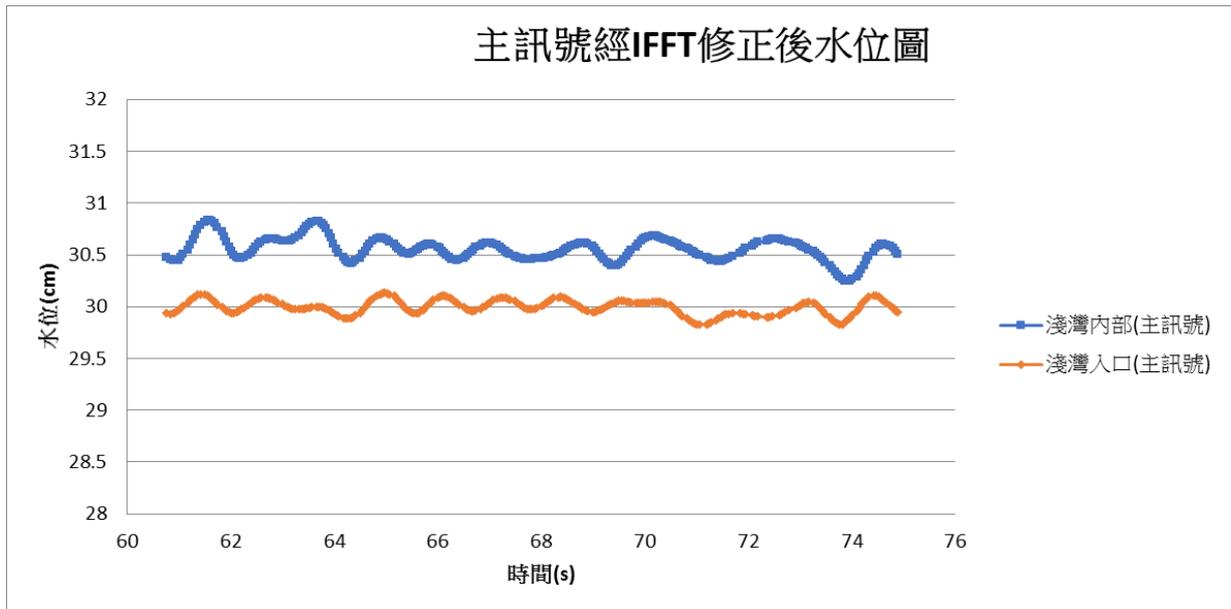
2. 方法二濾波之結果

(1)圖四十為實驗四之(一)的主要訊號，此圖截取自實驗四之(一)水位圖中振幅明顯增加的部分。



[圖四十]

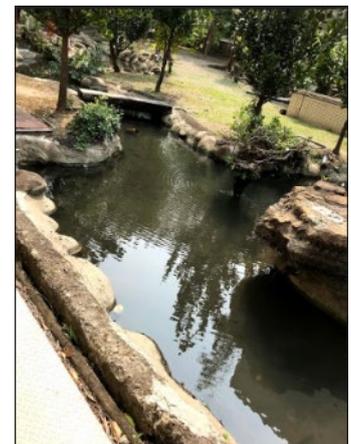
(2)圖四十一為將圖四十經 FFT 後，將 1Hz 以上訊號去除，再轉回時間域(IFFT)的結果：



[圖四十一]

濾波後的為較低頻的主訊號，從水位變化可以看出，訊號持續 15 秒的時間內，振幅先衰減再放大。如照片所示，實驗中接收器放置的位置，形狀「類似」Palu 海灣，可視為寬度由寬變窄的淺灣，淺灣入口及邊界相當於拘限能量的封閉端，當淺灣長度是半個波長的整數倍，入射波和反射波在淺灣內互相干涉形成駐波。本實驗振幅先衰減再放大的結果，很有可能在池塘淺灣內形成駐波。

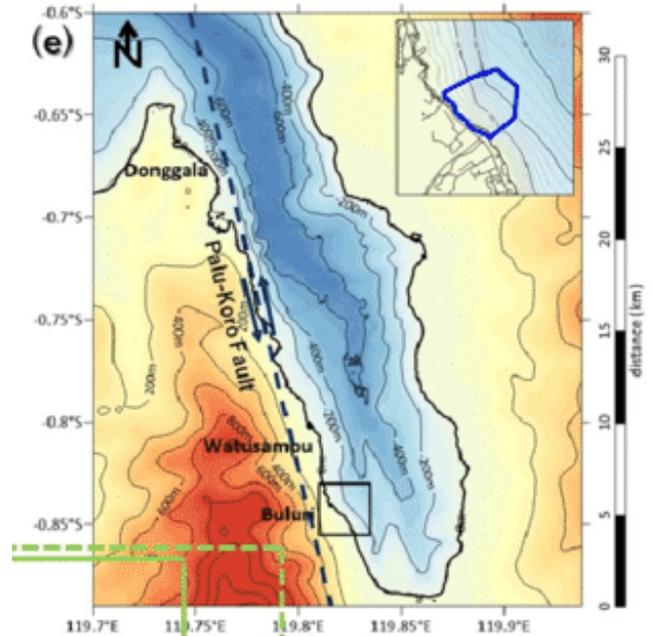
[圖四十二]



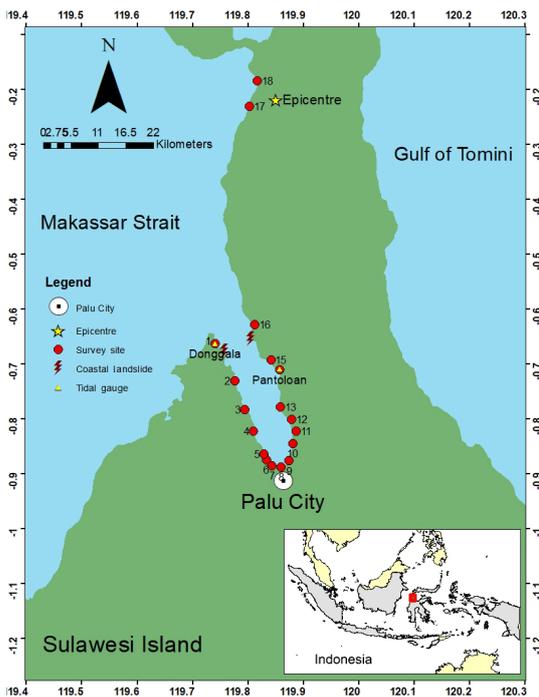
五、由實驗結果探討 Palu 海嘯成因：

(一)從水槽模擬實驗結果(結果與討論二)，緩坡比陡坡較易使水位堆高。圖四十三為 Palu 海灣的水深及地形，海灣由海延伸到陸地的地形為河谷，河川下游的沖積地形造成坡度小於 1：10 的低角度緩坡，所以波浪易堆高成為海嘯。

(二)從水池模擬實驗結果(結果與討論三)，塊體崩塌引起的水波，因為能量分散，只會造成局部的水位堆高。圖四十四為引起 Palu 海嘯的地震震央(黃色星號)及水位高度觀測站的分布(紅點)，不少測站觀測到超過 3 公尺的水位變化；圖四十五為海嘯造成海岸線被侵蝕沖刷及局部崩塌的空拍影像，2018 年 9 月 28 日蘇維埃西島發生強震時若引起塊體崩塌，雖然我們沒有觀測證據能確定地震引發的塊體崩塌面積，由這個實驗結果判斷，墜落對水位高度的影響範圍是非常局部的，塊體崩塌造成的海嘯影響範圍極小，從圖中 Palu 海嘯大範圍受災面積判斷，除了塊體崩塌，還有其他因素。



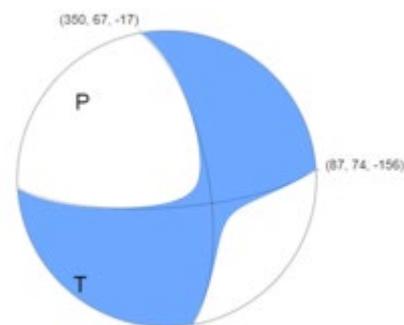
[圖四十三]



[圖四十五]

[圖四十四]

(三)從水池模擬實驗結果(結果與討論四之(一)~(二))，當水波入射方向和淺灣走向平行或垂直，主訊號峰值對應的頻率有時會和自然頻率的峰值一致。圖四十八顯示的是 Palu 海灣內各測站紀錄的海嘯高度，最低的 2 公尺，最高的 11.3 公尺，大部分觀測的波高都大於 3 公尺，引起海嘯的斷層垂直位移很小，從右圖海灣內各測站觀測資料顯示，3 公尺以上的大浪出現在海灣內部各點，而非只出現在海灣最內部端點。斷層平移錯動時，水波傳入海灣，除了海灣面積變窄波高增加，還可能有其他效應使波浪堆高引起海嘯，關於這些效應，以下第 5 點再詳細討論。



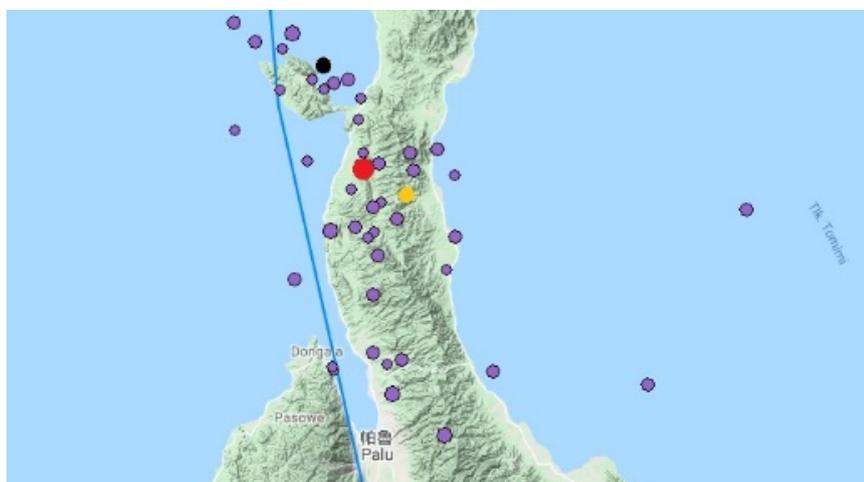
[圖四十六]

(四)從水池模擬實驗結果(結果與討論四之(三))，水波入射方向和淺灣走向平行，最容易使水位堆高。圖四十六為 2018 年 9 月 28 日蘇維埃西島發生強震的斷層面解，南北走向的斷層面和東西走向的輔助面都可能是引起地震的斷層，由實驗結果得知，和海灣走向平行的擾動方向能引起較大的水位變化，所以造成這次海嘯的主要斷層最可能是和 Palu 海灣走向平行的南北向斷層。

(五)從水池實驗進一步濾波分析結果(結果與討論四之(四))，因為實驗池塘的淺灣自然擾動很小，自然訊號對共振的效應並不明顯，水池實驗水位堆高的原因，比較像是水池淺灣之邊界效應，使能量拘限在兩端封閉的邊界內形成駐波；而 Palu 海灣本身特殊的形狀，應該具有相當強度的自然訊號，因此以下三種水位堆高的情況，若滿足某些條件，都有可能發生在 Palu 海灣，造成這次的海嘯災情：

條件 1.共振效應(resonant)：.當地震引起的水波主要頻率，與 Palu 海灣自然頻率相同，且兩者無時間相位差，則共振效應會使海灣內部多處水位堆高，但我們無法取得 Palu 海灣的水位隨時間變化的觀測資料，所以不確定是否發生共振。

條件 2.藕合共振(resonant inductive coupling)：水波主訊號頻率與海灣自然頻率相同，但兩者有時間相位差，當主訊號持續時間很長，相位差逐漸變小而產生共振。圖四十七為 2018 年 9 月 28 日蘇維埃西島地震之震央分布，黃點是前震，紅點是主震，黑點是我們蒐集的地震資料中第一次餘震，表格中是主震前後數次地震的震央經緯度及地震發生時間。主震到 Palu 海灣的距離約 80km，我們查閱的資料水深最深 700 公尺，根據淺水波公式 $v = \sqrt{gh}$ 估算，水波從震央到 Palu 約 30-40 分鐘，受限於篇幅，下表僅列出主震及部分餘震資料，餘震時間間隔約 2~15 分鐘，遠小於水波從震央到 Palu 海灣的時間，相當於持續時間很長的主訊號，和海灣的自然訊號產生藕合共振(resonant inductive coupling)，此一條件很有可能引起 Palu 海嘯。



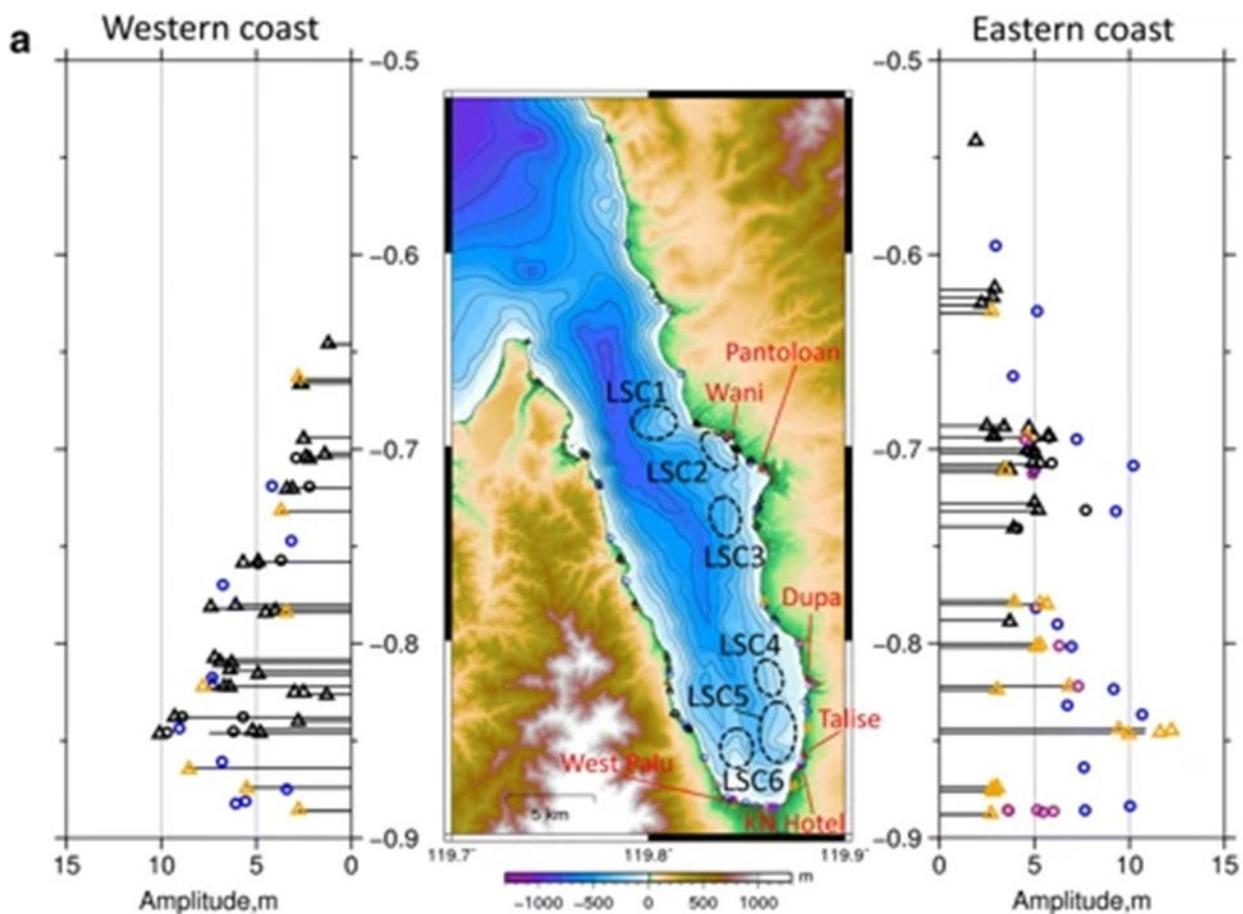
[圖四十七]

日期	時間(UTC)	地點	強度(芮氏)	深度(公里)
2018 / 09 / 28	9:20:33	0.244 南 119.882 東	Mag 4.5	USGS→10km IRIS→ km
	9:22:48	0.306 南 119.821 東	Mag 4.4	USGS→10km IRIS→ km
	9:57:37 圖四十七中黃點之地震	0.317 南 119.947 東	Mag 4.7	USGS→10km IRIS→10km
	10:02:45 主震	0.256 南 119.846 東	Mag 7.5	USGS→20km IRIS→10km
	10:14:20 圖四十七中黑點之地震	0.018 南 119.755 東	Mag 5.8	USGS→10km IRIS→ km
	10:16:48	0.875 南 120.034 東	Mag 5.7	USGS→10km IRIS→ km
	10:24:06	0.490 南 120.040 東	Mag 4.3	USGS→10km IRIS→ km

條件 3.邊界效應(boundary effect)：入射水波撞到淺灣邊界產生反射波，與持續進入淺灣的入射波形成駐波使振幅變大；或是多個反射波彼此干涉，在淺灣的某些特定位置建設性干涉使振幅變大。

圖四十八為 Palu 海灣各測站測到海嘯的最大波高，海岸東側各測站的波高起伏(紅色虛線)很像是多個反射波干涉的結果，波浪繞射入海灣時，形狀較平整的海灣西側多處成為波浪的反射點，反射波傳到東岸時，多波源互相干涉造成多處波高大於 5 公尺。為了簡化干涉的模式，將 Palu 西岸的多波源干涉視為一組雙波源干涉，圖中 X、Y 為雙波源，A 處為建設性干涉處，B 處為相鄰破壞性干涉處，量出 X、Y 分別和 A、B 波程差，兩個波程差相減的差值，即為水波波長的一半，計算出水波波長約為 2400 公尺。雖然 Palu 海灣長度是波長的兩倍，符合產生駐波的條件，但我們沒有 Palu 海灣測站的水位觀測資料，無法驗證是否產生駐波。

實際測到的波高是多個反射波干涉的結果，波長 2400 公尺大約是海灣長度的一半，若干個這樣長的波長很難在 Palu 海灣內產生完全的破壞性干涉，所以多處測站觀測到的都是疊加後的波浪，建設性干涉使多處浪高超過 5 公尺。



[圖四十八]

陸、結論

- 一、低角度的緩坡，較易使波浪堆高；陡坡會使水波反射，波浪較不易堆高。Palu 海灣連接的河谷地形為低角度的緩坡，所以波浪易堆高成為海嘯。
- 二、塊體崩塌引起的水波，傳遞時能量分散，如果引起海嘯，只影響局部的地點，所以塊體崩塌不是 Palu 海嘯的主因。
- 三、和海灣走向平行的擾動方向，相較於和海灣走向垂直的擾動方向，能引起更大的水位變化，所以造成 Palu 海嘯的主要斷層最可能是和 Palu 海灣走向平行的南北向斷層。
- 四、除了斷層和塊體崩塌，主震後頻繁餘震和水波形成耦合共振效應、海灣邊界效應形成多個反射波干涉，都是造成 Palu 海嘯的原因。

柒、參考資料

NOAA 美國國家海洋暨大氣總署 <https://www.noaa.gov/>

USGS 美國地質調查局 <https://www.usgs.gov/>

USGS latest earthquake <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

IRIS 地震學研究機構聯合會 <https://www.iris.edu/hq/>

IRIS seismic monitor <https://ds.iris.edu/seismon/index.phtml>

IRIS earthquake browser <http://>

<https://ds.iris.edu/ieb/index.html?format=text&nodata=404&starttime=1970-01-01&endtime=2025-01-01&minmag=0&maxmag=10&mindepth=0&maxdepth=900&orderby=time-desc&src=usgs&limit=1000&maxlat=34.40&minlat=10.86&maxlon=129.49&minlon=108.00&zm=5&mt=ter>

【評語】 051904

2018年印尼帕盧地震的海嘯成因於國際地震學界引發強烈討論，本研究選擇帕盧地震海嘯成因作為研究主題具國際視野，主題有趣、實用。為驗證帕盧地震的海嘯成因，作者群用校園的水槽及池塘為實驗場，精心設計海嘯波浪源及採用超音波儀器量測波傳歷時，藉由實驗數據探討海嘯成因。本研究藉由研讀發表文獻歸納海嘯的特徵並設計水槽實驗，檢驗成因的可能性，研究思路至為正確。唯本研究之實驗精度仍有提升空間，水槽實驗與海灣尺度差異對於實驗數據解釋宜再深究。此外，建議將實驗結果引申之推測與期刊文獻比較討論，以提升本作品之科學價值。

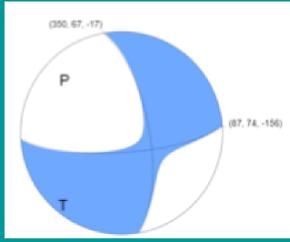
動機

2018年9月28日在印尼蘇維埃西島發生規模7.5的強震並引起海嘯。此地震來自垂直位移很小的逆滑移斷層，這個超乎專家預料之外的海嘯，以及palu海灣特殊的形狀，引起了我們的興趣。

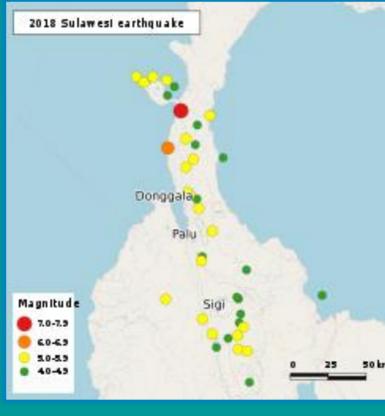
理論依據

一、斷層滑移方向

根據palu海灣附近的主震、餘震之震央分布以及引起主震之斷層機制解，由斷層機制解可以看出該斷層滑移方向為北偏西10度之南北走向，和海灣的走向十分接近。



考慮和斷層面垂直的輔助面，在水池操作實驗時，用兩組互相垂直的方向產生擾動來模擬不同的斷層滑移方向。



為何選擇週期6秒?

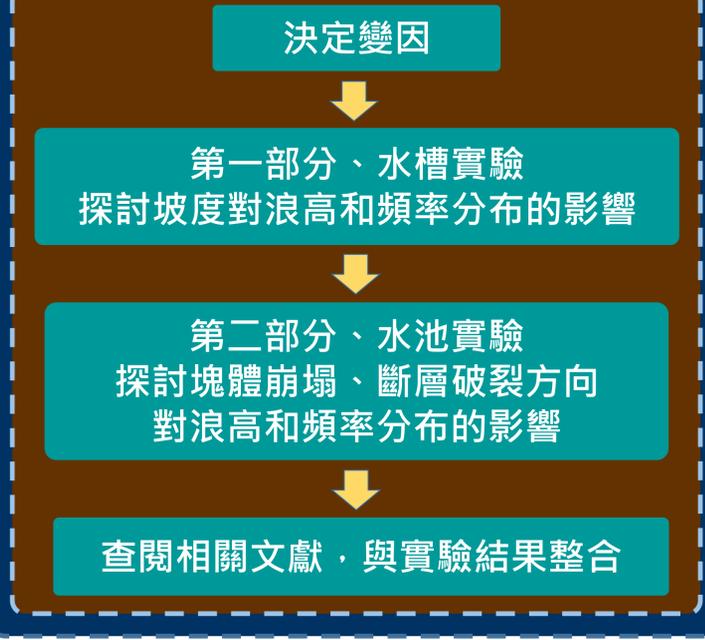
- 根據Tracker追蹤，波速 $v=1.26\sim 1.33$ 公尺每秒。海嘯屬於淺水波，此時頻率 f 最多0.51，意即週期 T 至少1.96秒
- 為使淺水波特徵更明顯，定週期為6秒

綜合海嘯的理論，以及查閱文獻的結果，我們設計了以下兩部分的實驗流程，探討2018年palu海嘯的原因。

目的

- 一、探討海底地形坡度對浪高與頻率分布的影響
- 二、探討海底塊體崩塌對浪高與頻率分布的影響
- 三、探討斷層滑移走向對浪高與頻率分布的影響
- 四、探討共振和邊界效應對浪高的影響

研究流程



二、塊體崩塌

有些學者認為地震同時引起塊體崩落 (landslide) 導致海嘯，因此在水池實驗時，用重物(捆綁4塊磚頭)自水面自由墜落，模擬塊體崩塌。

三、製造淺水波

淺水波公式 $v = \sqrt{gh}$ ，而水深13-35公分，在水槽或水池製造適當頻率的擾動，就能產生波長超過20倍水深的淺水波。

實驗流程

水槽實驗方法

水槽蓄水達13公分
平推木板，3秒推去、3秒拉回製造週期6秒的水波
手機錄影、Arduino測量水高

緩坡實驗
(地形變化小)

陡坡實驗
(地形變化大)

波高分析 & 頻率分析
利用Excel簡單計算分析，畫出波高與時間關係圖

水池實驗方法

斷層滑移方向

塊體崩塌

實驗時利用手機錄影
並以Arduino作為測量水高變化的儀器

波高分析 & 頻率分析
利用Excel進行傅立葉分析(FFT)，畫出頻率與強度關係圖

濾波

方法一、在頻率域中，將自然頻率的強訊號去除，還原成較不受自然頻率干擾的主訊號
方法二、延續FFT分析結果，將頻率1Hz以上訊號去除，進行IFFT

進行結果討論



水槽 緩坡實驗



水槽 陡坡實驗



水池 斷層破裂方向實驗



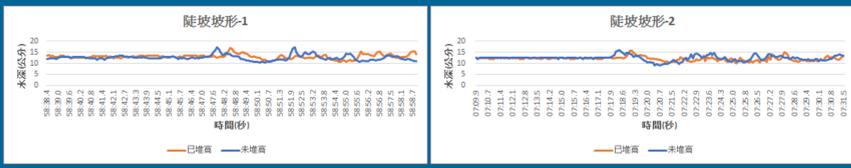
水池 塊體崩塌實驗

研究結果與討論

水槽實驗

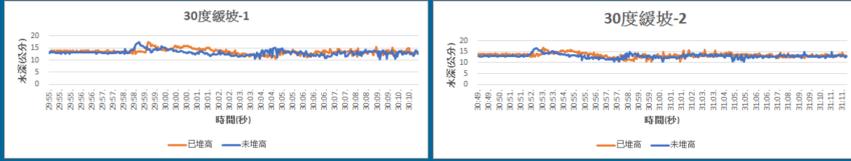
波高變化數據分析

陡坡



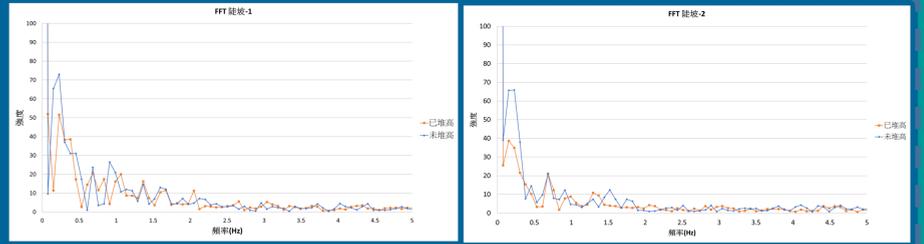
- 無明顯堆高
- 影片無法看出堆高

緩坡

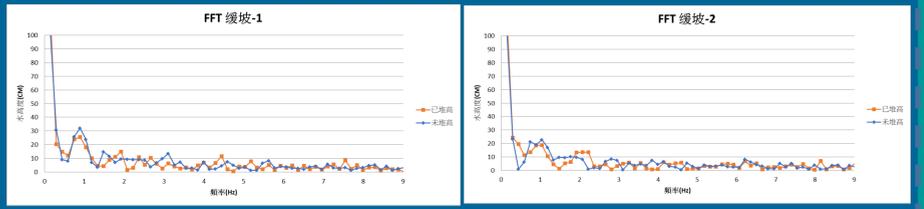


- 無明顯堆高
- 影片可看出堆高

頻率分析



- 頻率1/6Hz的強度衰減了

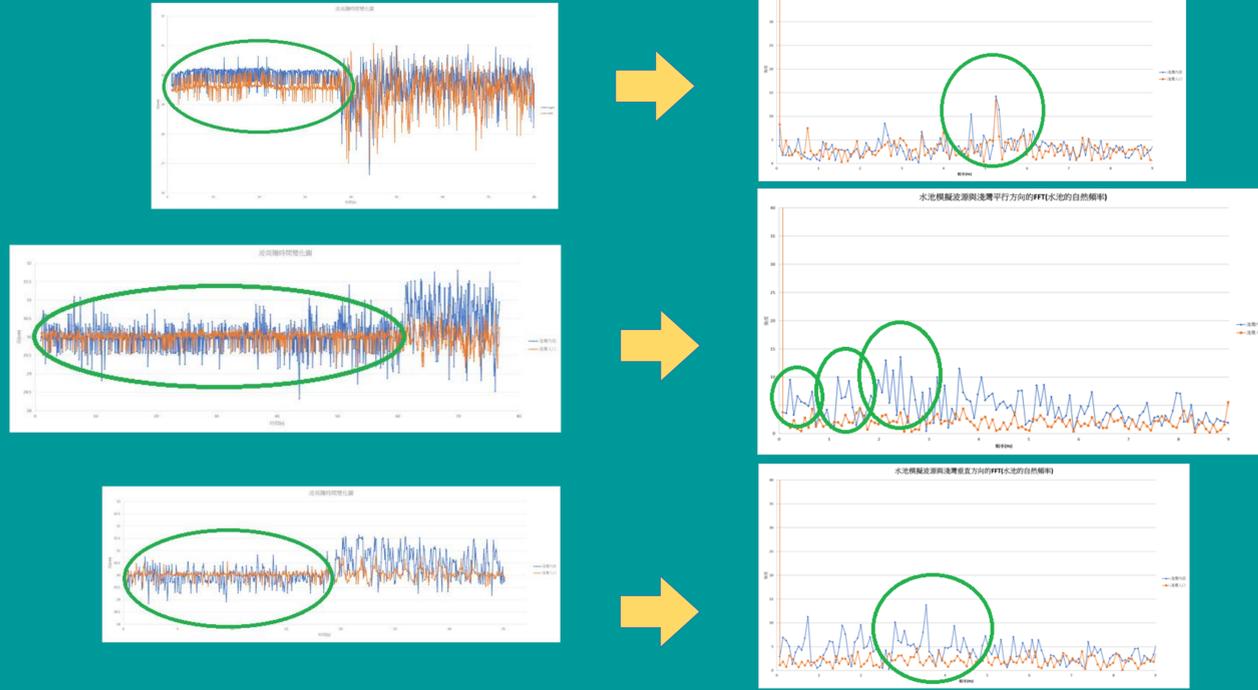


- 頻率1/6Hz的強度沒有明顯衰減

水池實驗 去除自然頻率

- 將主訊號前水位變化(綠色橢圓框起處)進行FFT
- 由上至下分別為塊體崩塌、斷層破裂方向平行海灣、斷層破裂方向垂直海灣

- 峰值即視為自然頻率



水池實驗 塊體崩塌

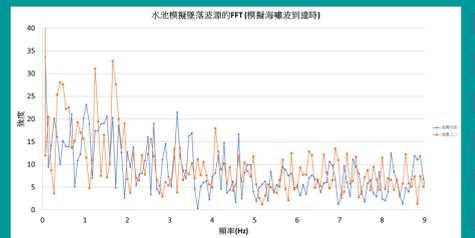
波高變化數據分析

- 無明顯堆高



頻率分析

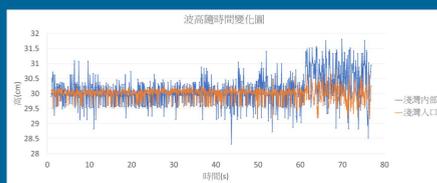
- 無明顯主訊號
- 形式上類似點波源



水池實驗 斷層破裂(水波入射)方向

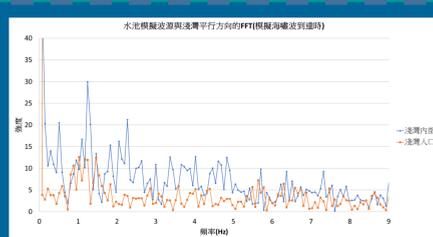
波高變化數據分析

破裂(入射)方向平行淺灣



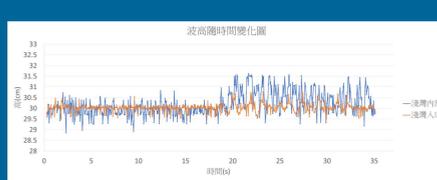
- 明顯堆高

頻率分析

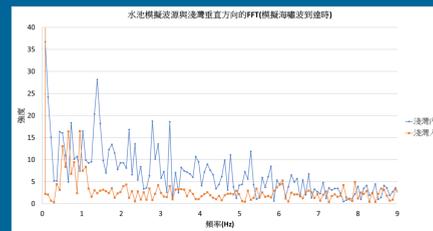


- 淺灣內部訊號增強，可能引起共振

破裂(入射)方向垂直淺灣

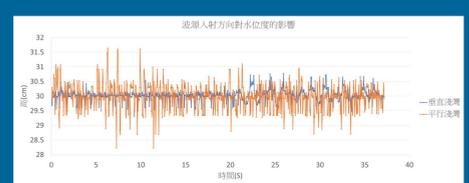


- 明顯堆高



- 淺灣內部訊號增強，可能引起共振

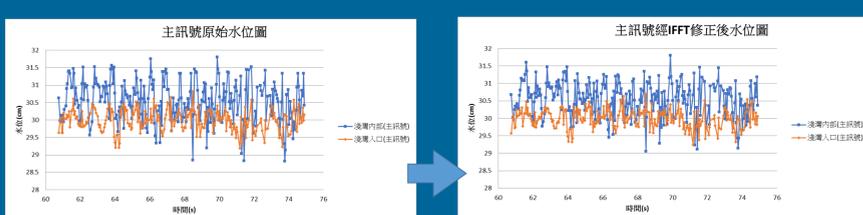
綜合比較 破裂(入射)方向平行與垂直



- 平行與垂直的實驗中，震源到sensor的距離不相同
- 依「振幅和距離平方成反比」進行比例換算
- 平行(橘線)的水波振幅大於垂直(藍線)的水波振幅
- 可能使振幅放大：
 - 1.共振
 - 2.耦合共振
 - 3.邊界效應

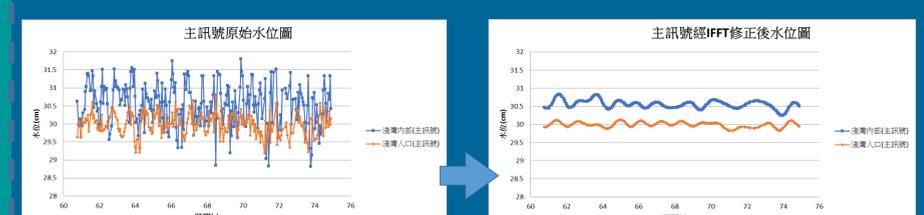
濾波—FFT和IFFT

方法一



- 自然頻率造成的影響不大
- 推測1和2並不是使水位堆高的原因

方法二



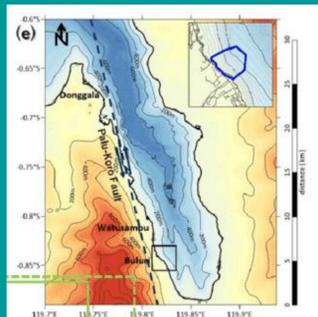
- 振幅先衰減再放大
- 可能在淺灣內形成駐波

研究結果與討論

水槽實驗與帕盧海灣

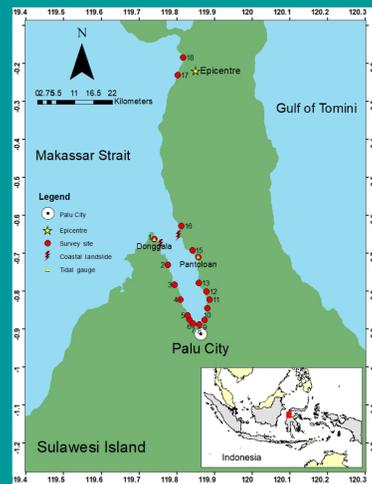
- 實驗結果：緩坡相較陡坡容易使水波堆高
- 帕盧海灣：低角度緩坡，容易使水波堆高

帕盧海灣等深線→



水池實驗與帕盧海灣

- 實驗結果：塊體崩塌
- 實驗結果：能量分散，僅局部水位堆高
- 帕盧海灣：大範圍受災與水位堆高，可能還有其他因素



海灣內測站，許多都測得浪高大於3公尺↑

斷層破裂(水波入射)方向與帕盧海灣

- 實驗結果：不論破裂(入射)方向垂直或平行海灣，都有可能使水波堆高(其他可能影響因素見濾波分析)。
- 帕盧海灣：海灣形狀由寬到窄，海水進入灣內可能因為面積縮小導致水位高增加

帕盧海灣，形狀為狹長型→



- 實驗結果：破裂(入射)方向，平行相較垂直又更容易使水波堆高。
- 帕盧海灣：引起地震的斷層為平行海灣的南北向斷層

南北向斷層(紅色虛線)→



濾波分析與帕盧海灣

雖然從分析結果看來，水波堆高的原因比較像是水池淺灣之邊界效應，使能量侷限在兩端封閉的邊界內形成駐波，但如果滿足一些特定條件，或許以下三種情形也可能造成水波堆高。

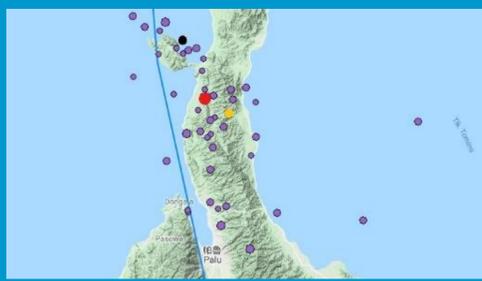
1.共振效應

條件：水波主訊號頻率與帕盧海灣自然頻率相同，而且無時間相位差

2.耦合共振

條件：水波主訊號頻率與海灣自然頻率相同，但有時間相位差，而且主訊號持續時間很長，使兩者相位差變小

日期	時間(UTC)	地點	強度(芮氏)	深度(公里)
2018 / 09 / 28	9:20:33	0.244南 119.882東	Mag 4.5	USGS→10km IRIS→ km
	9:22:48	0.306南 119.821東	Mag 4.4	USGS→10km IRIS→ km
	9:57:37	0.317南 119.947東	Mag 4.7	USGS→10km IRIS→10km
	10:02:45	0.256南 119.846東	Mag 7.5	USGS→20km IRIS→10km
	10:14:20	0.018南 119.755東	Mag 5.8	USGS→10km IRIS→ km
	10:16:48	0.875南 120.034東	Mag 5.7	USGS→10km IRIS→ km
	10:24:06	0.490南 120.040東	Mag 4.3	USGS→10km IRIS→ km

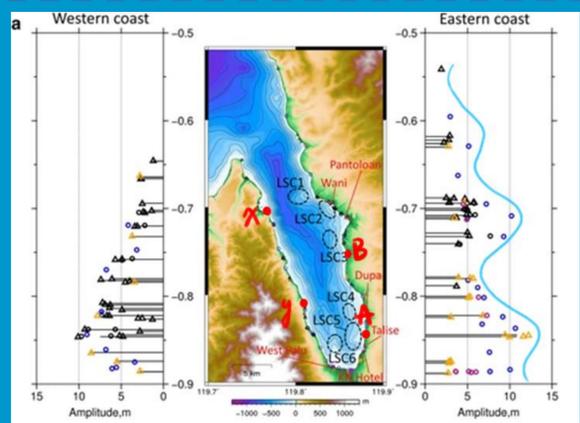


← ↑ 2018年9月28日帕盧附近發生的地震
黃點為前震，紅點為主震，黑點為餘震

3.邊界效應

條件：入射水波撞到淺灣邊界產生反射波，與持續進入淺灣的入射波形成駐波；或是多個反射波彼此干涉，在淺灣的某些特定位置產生建設性干涉
我們將其簡化為雙波源干涉，估算出波長大約是2400公尺。

帕盧海灣各測站測到海嘯的最大波高，
海岸東側各測站的波高起伏像是多個反射波干涉的結果→



結論

- 一、低角度的緩坡，較易使波浪堆高；陡坡會使水波反射，波浪較不易堆高。Palu海灣連接的河谷地形為低角度的緩坡，所以波浪易堆高成為海嘯。
- 二、塊體崩塌引起的水波，傳遞時能量分散，如果引起海嘯，只影響局部的地點，所以塊體崩塌不是Palu海嘯的主因。
- 三、和海灣走向平行的擾動方向，相較於和海灣走向垂直的擾動方向，能引起更大的水位變化，所以造成Palu海嘯的主要斷層最可能是和Palu海灣走向平行的南北向斷層。
- 四、除了斷層和塊體崩塌，主震後頻繁餘震和水波形成耦合共振效應、海灣邊界效應形成多個反射波干涉，都是造成Palu海嘯的原因。

參考資料

NOAA 美國國家海洋暨大氣總署 <https://www.noaa.gov/>

USGS 美國地質調查局 <https://www.usgs.gov/>

IRIS 地震學研究機構聯合會 <https://www.iris.edu/hq/>