

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

030502

運用地震儀測量河川流量

學校名稱：臺南市立金城國民中學

作者： 國二 侯姿羽 國二 蔡睿恩	指導老師： 顏憶萱
---------------------------------	------------------

關鍵詞：地震儀、流量、曾文溪

摘要

河道中水流會產生振動，由岩石傳出去，若在河流旁裝地震儀，是否能測量水流量？本研究在曾文溪河道旁安裝地震儀，測試地震儀應用於觀察水流量是否可行，並拍攝水流影片，再利用大尺度影像質點速度測量法計算流量，目的要與地震儀紀錄做比較。計算地震儀資料中每分鐘振幅的最大值和平均值後，發現資料能反應水流變化，特別是將記錄濾波在頻率 10 到 50 赫茲間。我們利用流量與振幅的關係，提出能計算流量的公式。地震儀紀錄轉換為時間-頻率圖時，也可看出水流變化。分別觀察水位上升與下降時，發現振動能量上升與下降並不尋相同的軌跡變化，推測水位上升時有石塊搬運作用，而下降時沒有。此可稱遲滯現象，表示地震儀可觀察水流變化與土石搬運作用。

壹、研究動機

2018 年 8 月 23 日因熱帶性低氣壓與西南季風輻合產生劇烈降雨，在雲嘉南高屏等地區導致多處淹水等災情，引發我們對於如何加速觀察洪水事件的發生過程產生興趣。透過一系列的資料收集，我們發現目前在台灣最普遍的河川水流觀測方式是利用跨越河道的橋樑，在橋上裝設各式各樣的觀測儀器，如水位計、表面流速計等。這些傳統的河川觀測方法經過長時間的使用，已經是很成熟且穩定的科學觀測技術，但受到橋樑的位置和數量有限、儀器成本高、自然河道可能常常改變等因素的影響，現有的觀測儀器卻可能無法提供足夠而且快速的河川水流狀況資訊。在觀察河流中水流動時便可以發現到，水流強弱不同會產生不同大小的聲音，在八年級理化課程「波動與聲音」中，我們學到聲音是空氣產生振動的現象，故我們推測其振動的來源應該是水的流動，振動能量傳遞到空氣這種介質中才產生聲音。環繞著河水的介質除了空氣，還有河流下面的岩石，河水產生的振動同樣也可能透過岩石傳遞出去。因此，我們希望藉由在河流旁的岩壁上安裝地震儀來觀測河水產生的振動，這樣的河水觀測方法就不必依賴橋樑，也不會受到河水流動路線改變的影響而不能正常測量。

除此之外，河水中也可能會夾帶著土石，當水中的土石量非常巨大時，便可能形成所謂的土石流，這是台灣常見的自然災害之一。土石流流動時同樣會產生明顯的地表振動，可以

被附近的地震儀記錄下來。因此，我們希望藉由安裝在河道旁的地震儀同時也記錄到水中土石搬運產生的振動。

貳、研究目的

為了觀察水流產生的振動，並且嘗試量化振動能量與水流強弱間的關係，我們擬定了以下三個主要的研究目的：

- 一、了解地震儀是否可以記錄到河水變化
- 二、利用地震儀紀錄計算出河水流量
- 三、了解地震儀是否可以記錄到河水中石塊的搬運

參、研究設備及器材

本研究主要使用的儀器有四項，以及其他輔助的測量器材。主要的研究儀器如下：

- 一、地震儀(包含三軸地聲計、記錄器、機車電池、太陽能板)(圖 1)
- 二、數位相機(圖 2)
- 三、Garmin 手持式 GPS(圖 2)
- 四、大疆 Phantom 4 Pro 空拍機(圖 3)



圖 1、地震儀設備



圖 2、數位相機與手持式 GPS



圖 3、空拍機

肆、研究過程或方法

為了了解河流中水量的變化是否也會產生不同程度的地表振動，研究需要用到的資料包括河流的流量，以及地震儀的紀錄。其中河流的流量是使用大尺度影像質點速度測量法(LSPIV)進行分析獲得，而地表振動則是利用安裝在河道旁的地震儀來進行觀測，研究流程主要分為前面提到的兩個部份(圖 4)。本研究於 2018 年 10 月 13 日至曾文水庫水力發電站出水口安裝地震儀，並且進行無人機空拍，以及使用 GPS 紀錄地面控制點座標與高程(海拔高度)(圖 5)。藉由水力發電站進行放水及關水的操作，本研究在 2018 年 10 月 13 日拍攝到水流由大變小的過程，約 20 分鐘。另外，又於 2018 年 10 月 17 日拍攝到水流由小變大的過程，同樣約 20 分鐘(圖 6)。

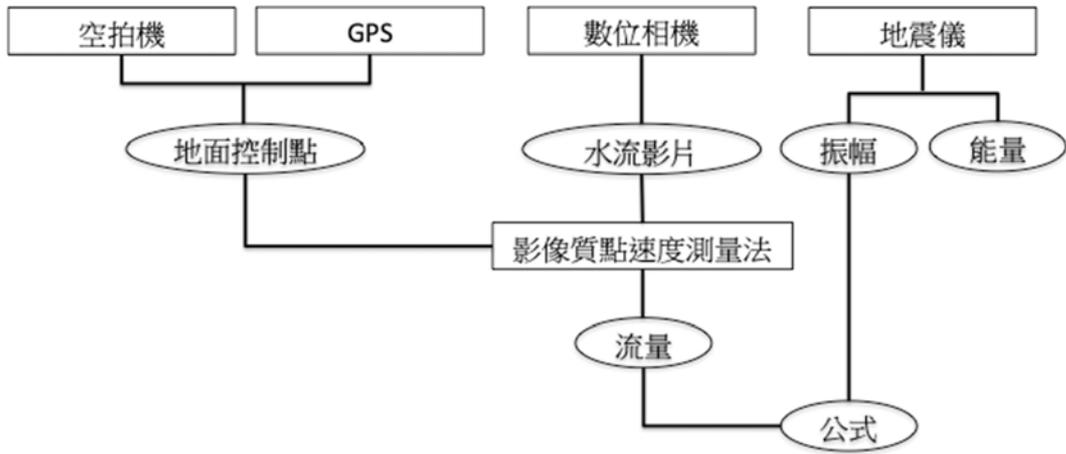


圖 4、研究流程圖

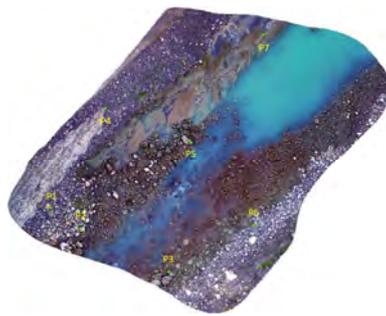


圖 5、無人機空拍影像，以及正射化使用的地面參考點(P1~P7)



圖 6、(左)水流最小時的影像、(右)水流最大時的影像

一、大尺度影像質點速度測量法(LSPIV)

大尺度影像質點速度測量法(LSPIV)是利用連續拍攝的兩張照片間，分析裡面各個像素的相關性，來計算出質點的移動方向和距離。若知道兩張照片拍攝的時間差，就可以進一步計算出質點移動的速度。Le Boursicaud 等人(2016)發表了利用 LSPIV 去分析一段水流錄影影像，可以獲得水流的表面流動速度。該研究甚至提出任意一段 Youtube 上的河流影片都可以利用 LSPIV 去計算出表面的流速，也就是說架在河流旁邊的攝影機都可以被運用來分析河水的流速，這對於發布洪水的警報有很大的幫助。

本研究便利用 LSPIV 可以計算出河水表面流速的優點，在曾文水庫水力發電站出水口附近的曾文五號橋上安裝攝影機，拍攝水力發電站進行放水及關水的過程(圖 7)。另外，因為進行 LSPIV 分析至少需要 6 個地面控制點，本研究利用無人機拍攝研究河道，並且從中找出 7 個容易辨認的石塊作為地面控制點。7 個控制點又分別使用 GPS 準確測量大地座標和海拔高程，用來將原本斜拍的影像轉為俯拍(稱為正射化)。除了表面流速之外，若要獲得水流流量還需要有河道的通水面積。因此，我們利用河道中水位較低的時候，用捲尺測量出河道的剖面(圖 8)。獲得上面的資料後，我們使用免費的 LSPIV 分析軟體 Fudaa-LSPIV，操作流程如圖 9。其中步驟 2~4 便是將影像進行正射化的過程，獲得的正射影像如圖 10。本研究將拍攝到的水流影片，挑選每分鐘的第一秒進行表面流速分析，最後可獲得的表面流速分布如圖 11。

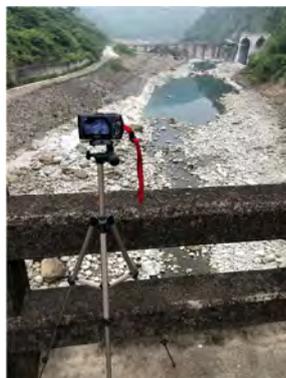


圖 7、架設於曾文五號橋上的數位相機

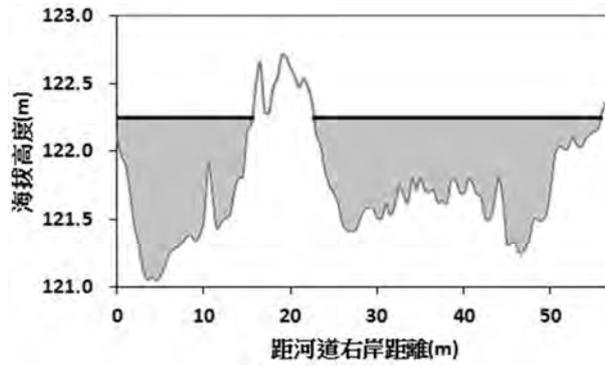


圖 8、測量獲得的河床剖面



圖 9、LSPIV 分析流程



圖 10、(左)正射化前的照片、(右)正射化後的照片。圖中紅點為地面參考點(P1~P7)

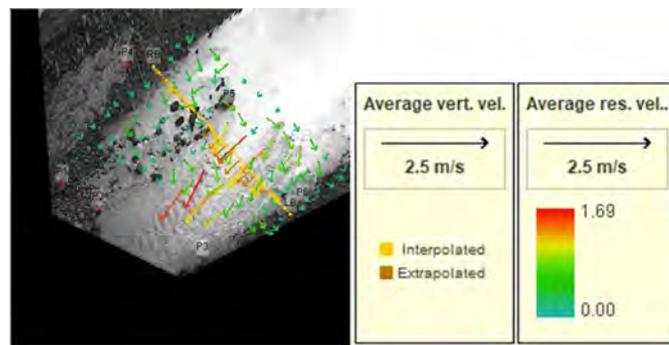


圖 11、LSPIV 表面流速分析結果示意圖，圖中黃色點線為河道剖面線。

二、地震儀紀錄分析

本研究於曾文溪五號橋下河床旁安裝了一組三軸速度型地震儀(圖 12)，儀器距離河道中心線 29 公尺，地震儀的紀錄頻率設定為每秒 200 個紀錄點。地震儀紀錄分成三個方向(垂直向、南北向、東西向)，為了了解河水流動產生的振動是以哪種方式傳遞到地震儀，因此我們把紀錄轉為垂直向、切向與徑向。地震儀紀錄分析分為兩個部分，時間域的振幅分析，以及頻率域的頻譜分析。在振幅分析部分，先將地震儀紀錄取絕對值，再分別計算每一分鐘內的平均值(圖 13)。同時，為了了解河水流動產生的振動是否集中於某一段特別的頻率範圍，所以另外也透過濾波的方式，去計算在不同頻率段每分鐘的振幅平均值。在頻譜分析部分，則是將地震儀紀錄透過傅立葉轉換為頻率域資訊。為了了解振動訊號隨時間的變化，於是再將所有轉換後的頻率域振動能量強弱資訊和時間連結，製作成時間-頻率圖(其後簡稱為時頻圖，如圖 14)。

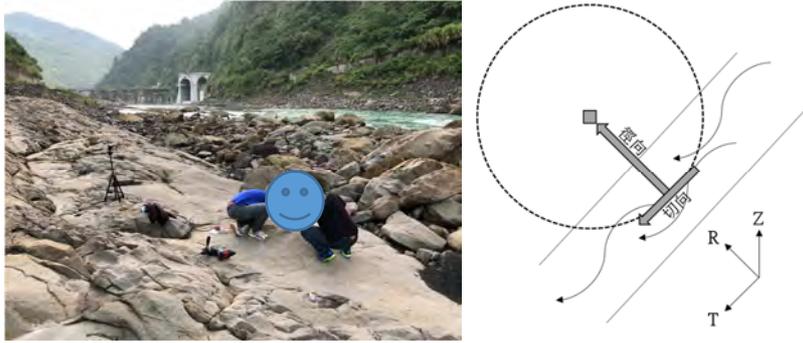


圖 12、(上)在河床旁安裝地震儀(照片中黃色儀器為三軸地震儀)，照片中上方灰白色隧道為水庫水力發電廠排水隧道口、(下)地震儀與河流間的位置關係圖。

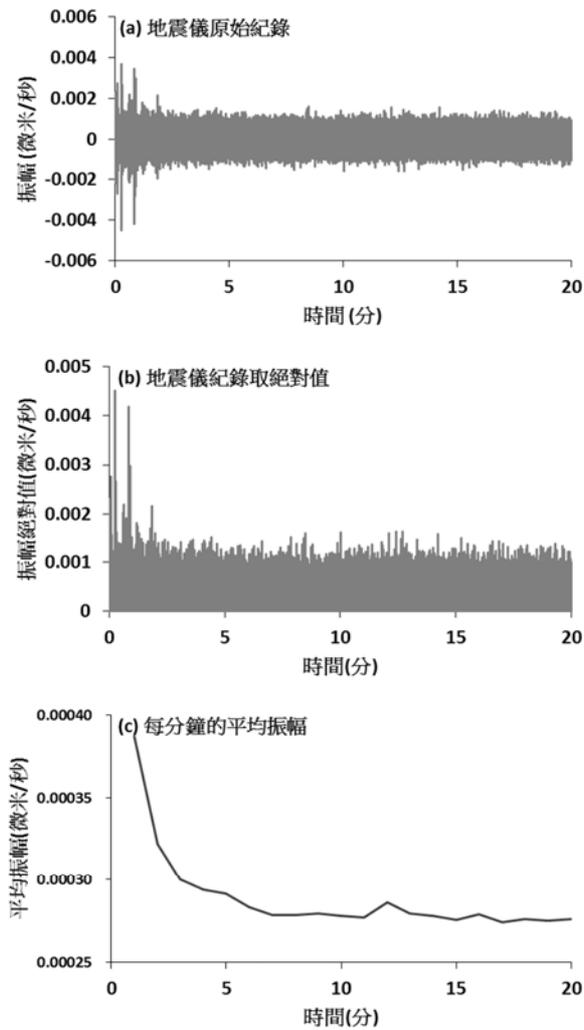


圖 13、地震儀紀錄分析過程。(a)原始的地震儀紀錄(每秒 200 個紀錄點)、(b)地震儀紀錄取絕對值、(c)將地震儀取絕對值再進行每分鐘平均。

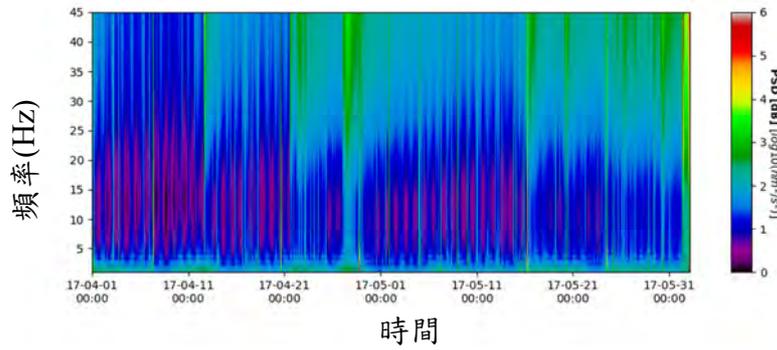


圖 14、時間-頻率圖(示意圖，非本研究結果)

伍、研究結果

一、河水的流量

利用 LSPIV 分析河道中的水流，可以獲得水位下降與上升過程中的每分鐘平均流量(圖 15 與圖 16)。從 10 月 13 日發電廠關水的過程可以得知，水位最高時(海拔高度 126.21 公尺)，平均流量為 50.085 立方公尺/秒(圖 17)；水位最低時(海拔高度 125.34 公尺)，平均流量為 8.268 立方公尺/秒。水位下降的過程歷時約 20 分鐘，之後就保持穩定的水流，直到 10 月 17 日發電廠開始放水。發電廠放水的過程則從平均流量為 0.246 立方公尺/秒，上升至平均流量為 36.237 立方公尺/秒(圖 18)。發電廠公布的發電用水量為 50 立方公尺/秒，與本研究計算得到的最大平均流量大致相同，也表示本研究所採用的 LSPIV 分析方法是可行的。因為 13 日關水後，河流中就一直保持在低水位的狀態，所以流量緩慢地持續變小，直到 17 日再開始放水時，流量已經低至 1 立方公尺/秒以下。

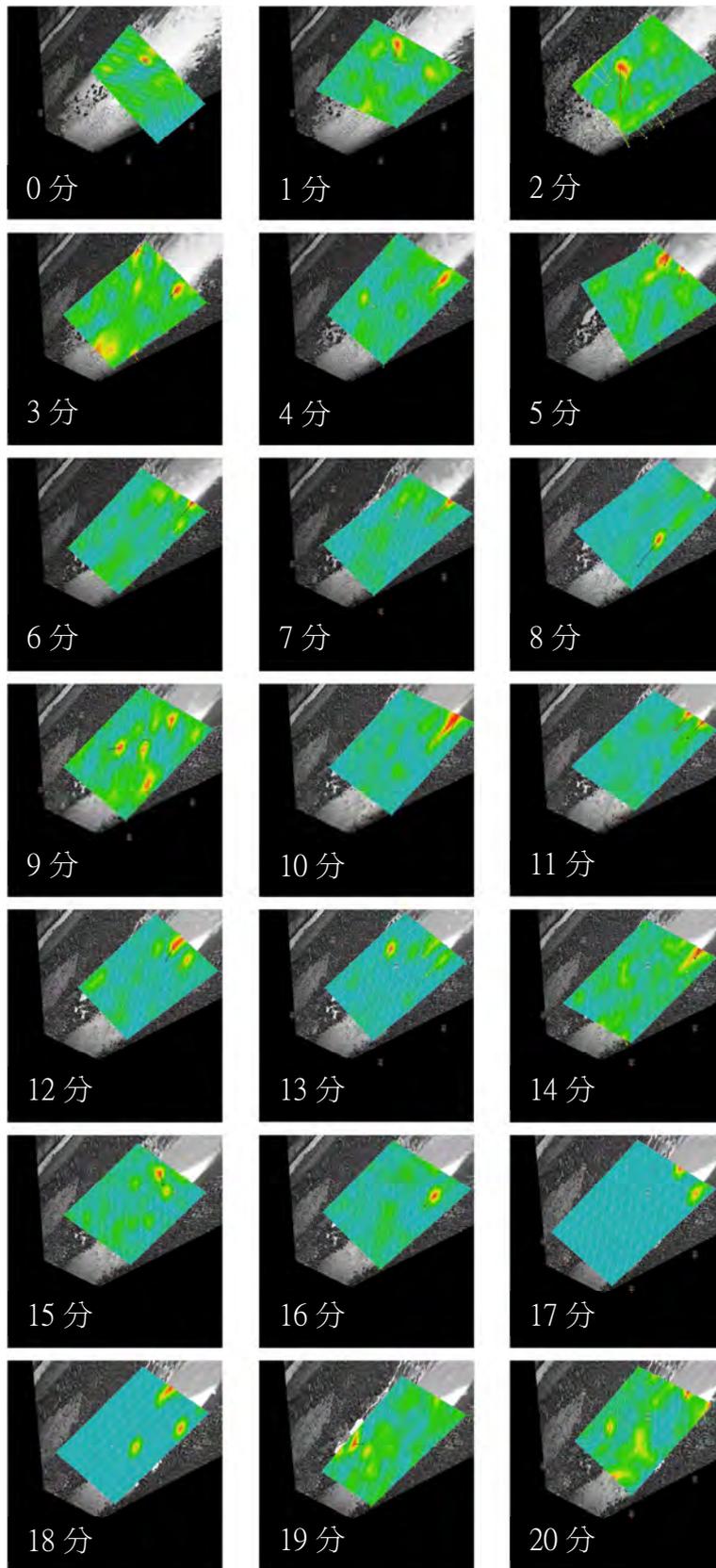


圖 15、水位下降過程的 LSPIV 分析結果

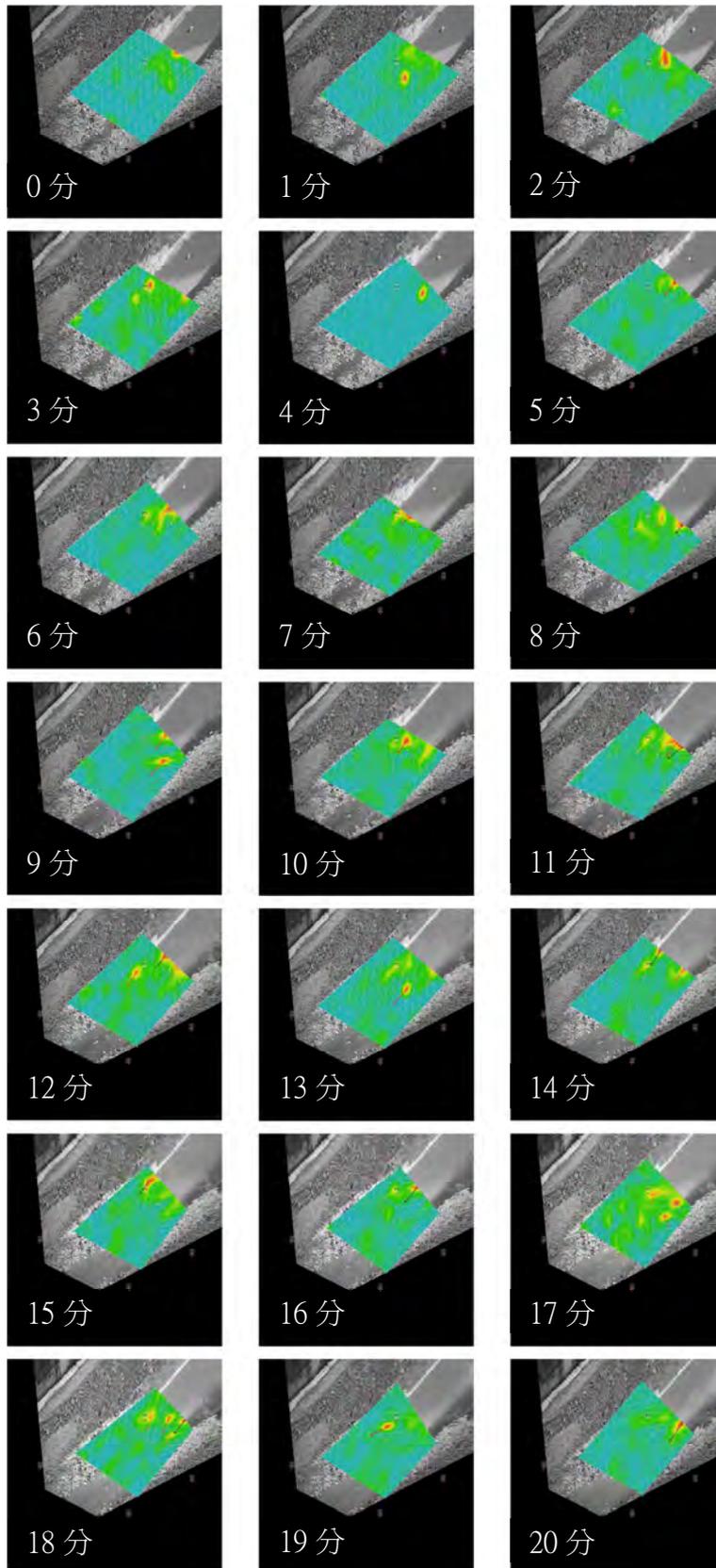


圖 16、水位上升過程的 LSPIV 分析結果

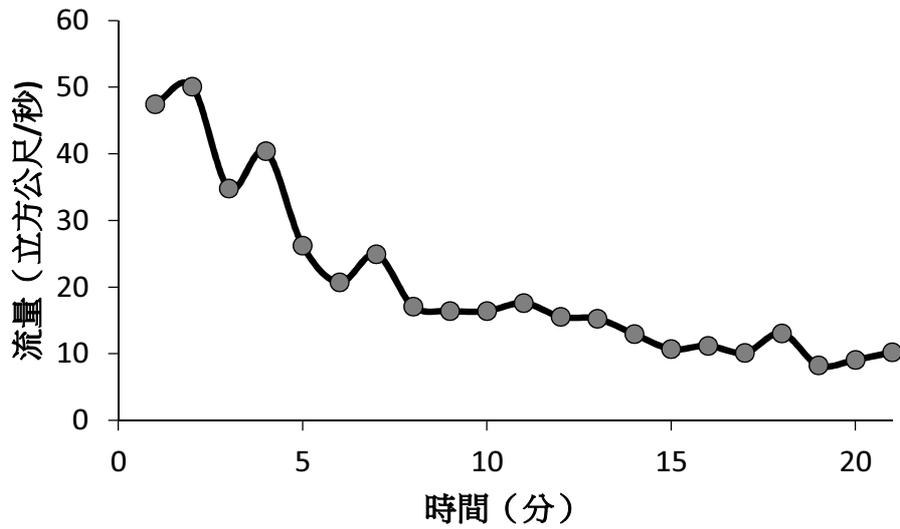


圖 17、水位下降過程的流量變化

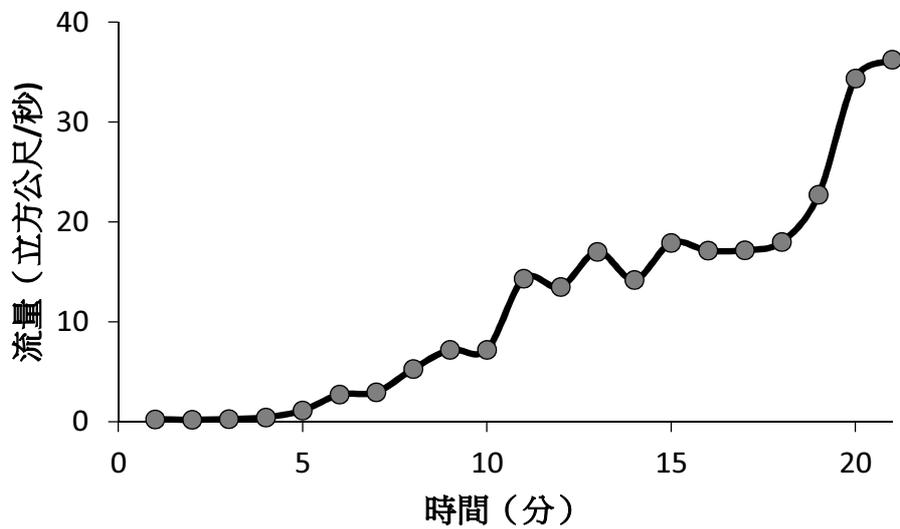


圖 18、水位上升過程的流量變化

二、時間域的地震紀錄

將地震儀記錄到的振動訊號繪製成時間-振幅圖(圖 19)，在三個方向中看出在水流較大時，相對有較大的振幅值，但是當水流較小時，就不容易從原始的振幅變化中看出水流的變化。因此，必須將原始的地震儀紀錄進行一連串前處理，計算出平均振幅才能與流量變化進行比對。比對流量與每分鐘平均振幅(圖 20)，可以觀察到流量與平均振幅之間有著明顯的正相關，水平方向的決定係數高於垂直向，但整體而言決定係數並不高。其中垂直向的決定係數僅有 0.28。在徑向可以發現，平均振幅大於 0.00017 微米/秒的資料點分布相對地分散。相同地，在

切向的資料中，平均振幅大於 0.00017 微米/秒的資料點分布也相對地分散。這個現象可能暗示了在較大平均振幅的時間點，能量可能有其他來源，不僅僅是水流所產生的振動。

為了縮小振動能量可能的來源，所以我們將地震儀紀錄進行了濾波，只留下特定頻率範圍的振動。同樣將濾波後的地震儀紀錄進行前處理，計算出每分鐘平均值，再與每分鐘的流量進行比較。本研究設定地震儀為每秒 200 個記錄，所以可靠的資料頻率為 100 赫茲。因此將紀錄以每 10 赫茲一個區間進行濾波，而產生 10 個不同頻率範圍的振動紀錄(1~10 赫茲、10~20 赫茲、20~30 赫茲、30~40 赫茲、40~50 赫茲、50~60 赫茲、60~70 赫茲、70~80 赫茲、80~90 赫茲、90~100 赫茲) (圖 21)。進一步比對流量與各頻率範圍內的平均振幅，逐一求得兩者間的決定係數，我們發現 10~50 赫茲的振動紀錄與流量之間的相關性高於不濾波時的決定係數。比較 10~50 赫茲的振動紀錄的水平向平均振幅與流量(圖 22)，就可以觀察到兩者間的明顯正相關，決定係數也有上升的狀況(圖 23)。時間域的振動紀錄與流量間的相關性就可以藉此建立，另外我們也可以推論水流變化對於地表振動的影響主要落在頻率 10 到 50 赫茲之間，在此頻率範圍外的能量應該來自其他環境中未知的振動。

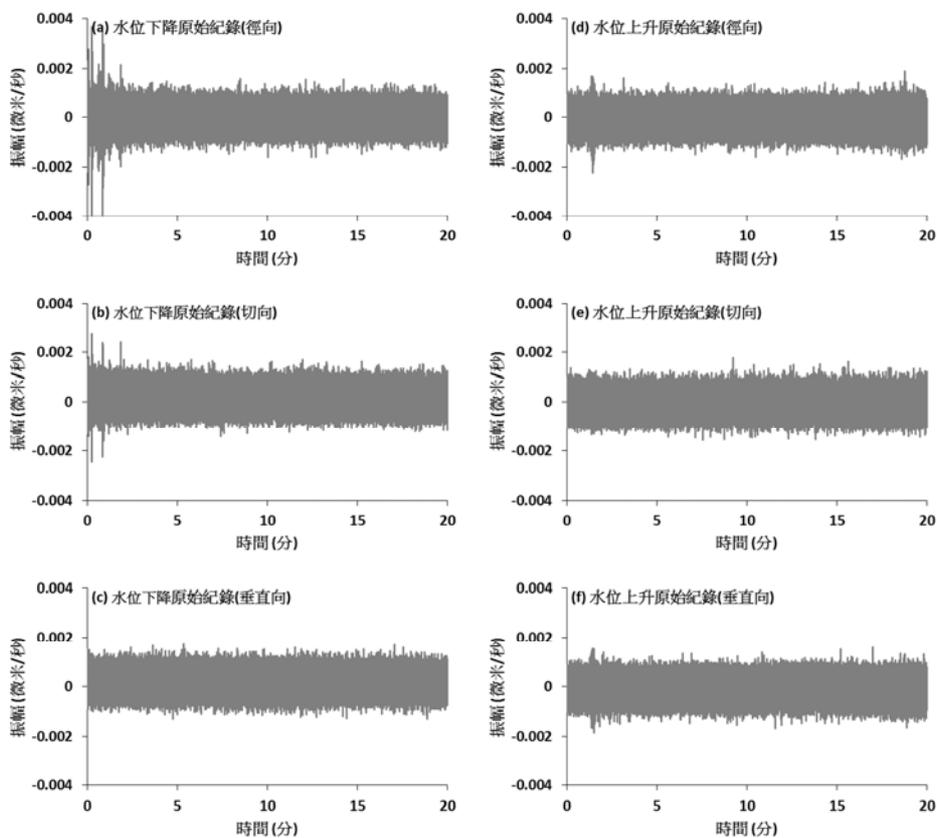


圖 19、地震儀原始記錄

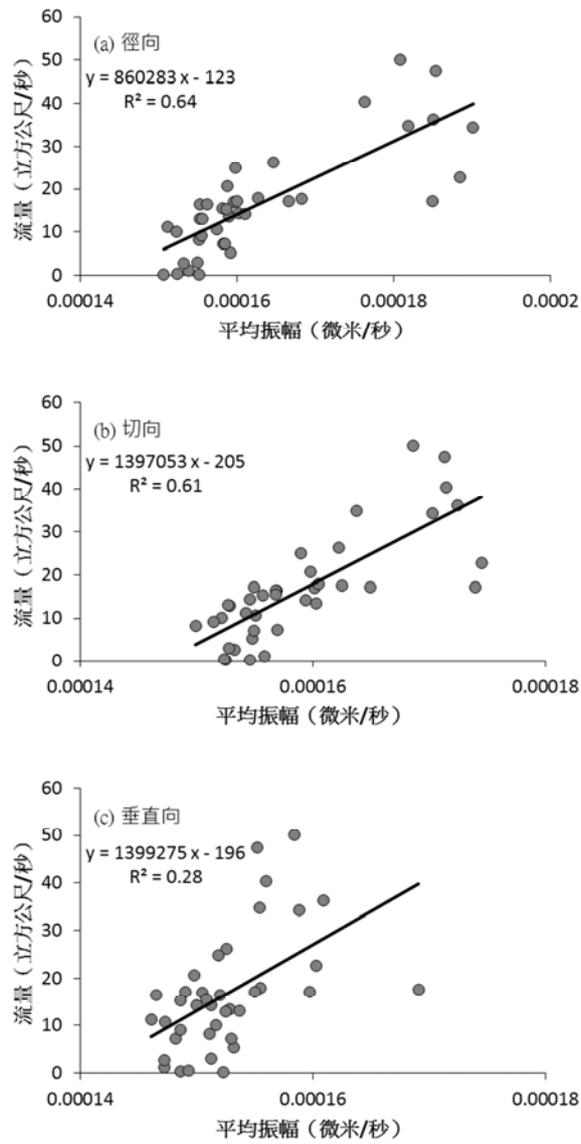


圖 20、振動訊號的平均振幅與流量的相關性

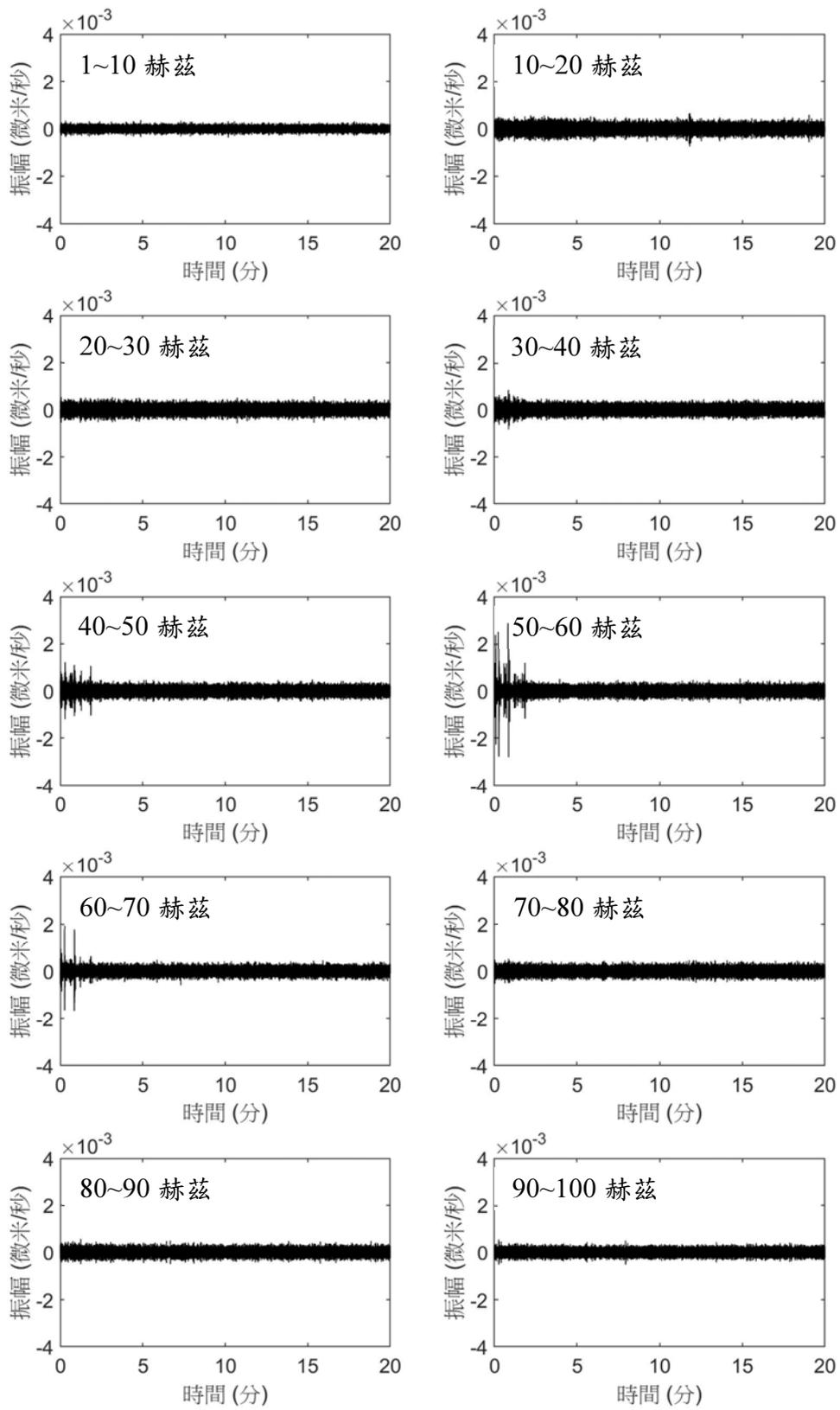


圖 21、水位下降過程不同頻率範圍的徑向振動記錄

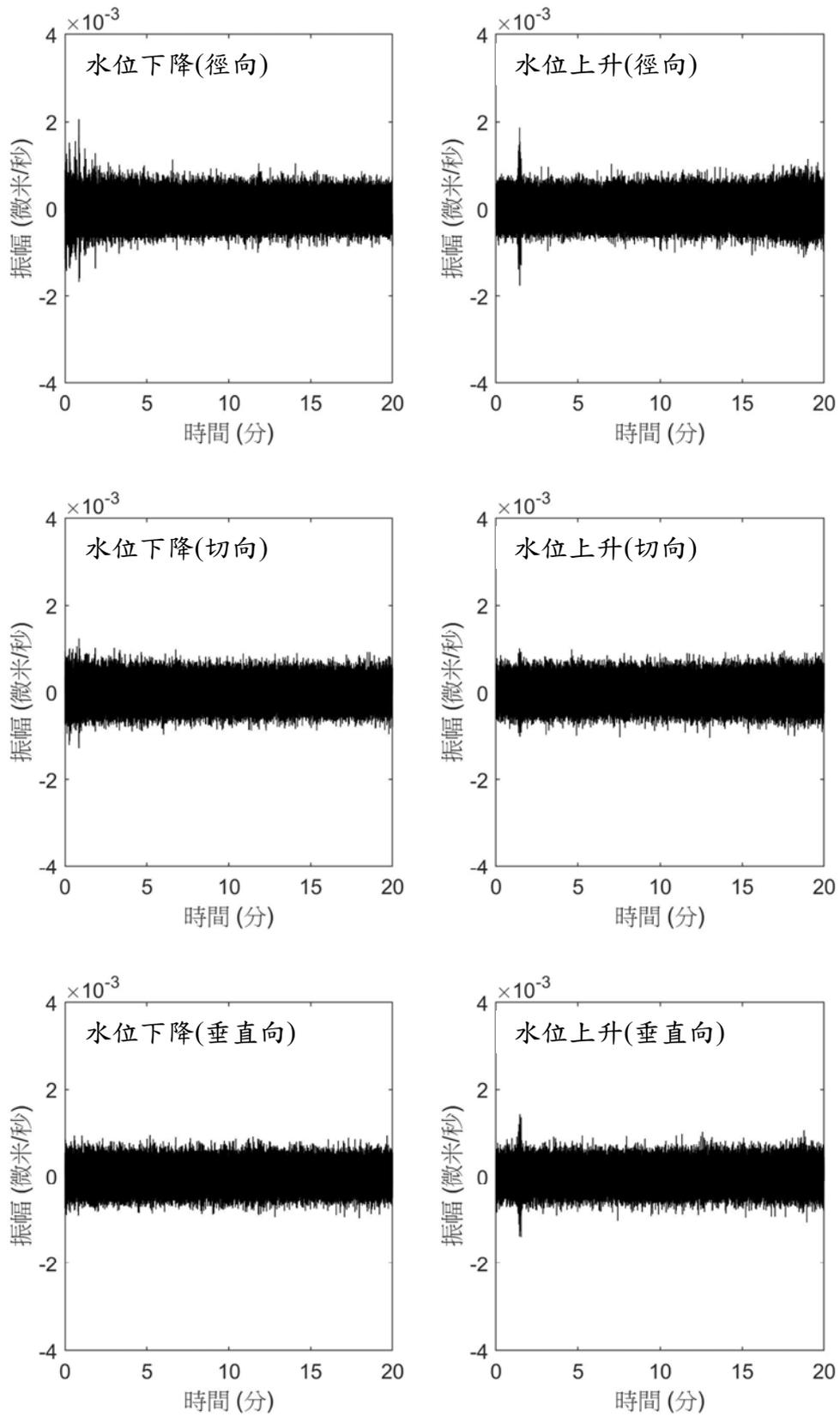


圖 22、10~50 赫茲的振動記錄

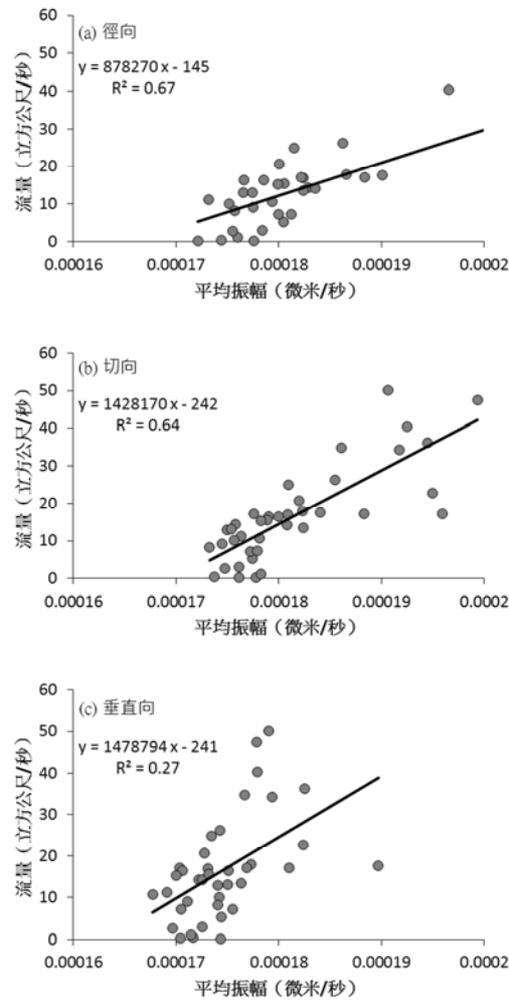


圖 23、10 至 50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性

三、頻率域的地震紀錄

將水位上升和下降過程中分別的 20 分鐘地震儀紀錄轉換為時間與頻率關係(圖 24 及圖 25)，我們可以發現隨著水流改變，時頻圖中的能量分布也發生改變。在圖 24 中，能量譜密度(PSD)在 7 分鐘後開始有變大的現象，一直到 15 分鐘後能量增加更為明顯。比對 LSPIV 的流量分析結果，水流變大的第 7 分鐘時，流量為 2.95 立方公尺/秒；第 15 分鐘時，流量為 17.9 立方公尺/秒。這個結果可能表示當河水的流量大於 3 立方公尺/秒，所產生的振動才能從時頻圖中被觀察出來。當流量大於 18 立方公尺/秒，水流的振動所產生的能量變化就能在時頻圖中被清楚的觀察到。

另外，在圖 25 中能量譜密度(PSD)從一開始就有明顯下降的趨勢，直到第 6 分鐘後能量下降就不太明顯了。同樣比對 LSPIV 的流量分析結果，水流變小的第 6 分鐘時，流量為 20.7 立方公尺/秒，表示當河水的流量小於這個數值，水流的振動所產生的能量變化就不容易在時頻圖中被清楚的觀察到。比較水流上升與下降的過程，就可以發現當流量小於 3 立方公尺/秒時，水流產生的能量就太小，距離河道 29 公尺的地震儀紀錄就不容易觀察到水流的變化。所以應用地震儀去觀測水流的變化仍然有一定的限制，例如水流強弱、地震儀距離等。

從時頻圖中，我們另外觀察到 10 赫茲以上的能量變化與水流變化才有同步的現象，小於 10 赫茲的能量就與水流變化無關。因此，如果要利用振動的能量去推測水流大小，應該要採用頻率 10 赫茲以上的地震儀記錄，才不會受到與水流無關的頻率範圍的能量干擾，而導致更多誤差。上面的討論也呼應了時間域的地震記錄分析結果，若沒有經過濾波，振幅與水流變化的關係會受到頻率 10 赫茲以下振幅的干擾，所以決定係數並不是非常高。透過濾波後，排除頻率 10 赫茲以下的振動能量，決定係數就會相對提高了。

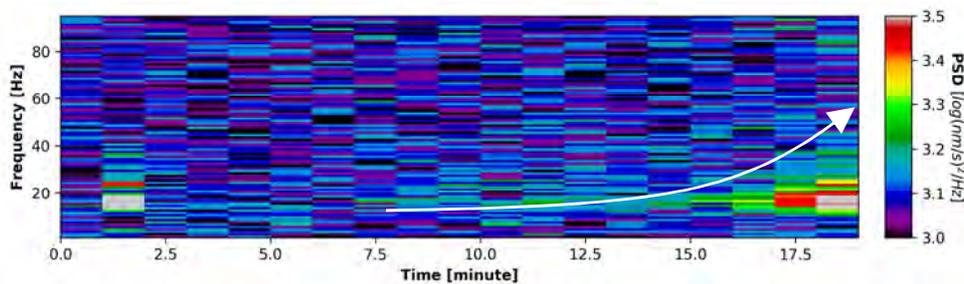


圖 24、水位上升過程的時頻圖

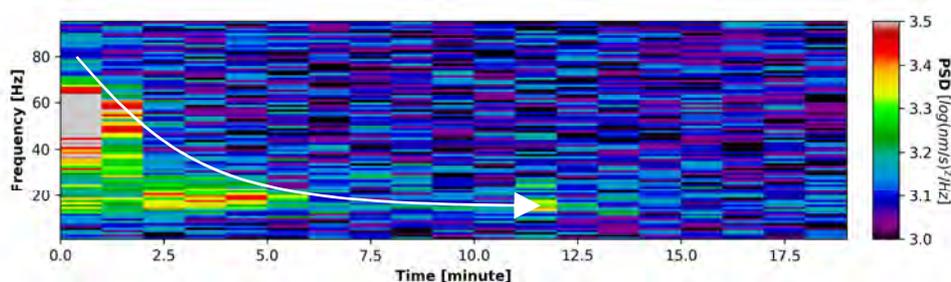


圖 25、水位下降過程的時頻圖

陸、討論

一、河水產生的振動如何傳遞到地震儀

振動能量在地球岩石中以波傳遞的方式可區分為體波與表面波兩種，其中體波又有 P 波和 S 波，表面波則有樂夫波與雷利波，四種波的傳遞過程和質點的運動方式均不相同。其中體波主要是在地球內部傳遞的地震波，而河水流動屬於地表面的振動作用，因此 P 波和 S 波應該不是主要的振動傳播方式。那麼河水產生的振動主要是以何種表面波傳遞至地震儀呢？可以從三個方向的振幅大小進行討論。從圖 26 中可以觀察到不論是水位上升或下降，徑向的平均振幅都大於切向與垂直向，而垂直向則是最小。因此，我們推論河水產生的振動最主要以雷利波的方式傳遞至地震儀，其次才是樂夫波。

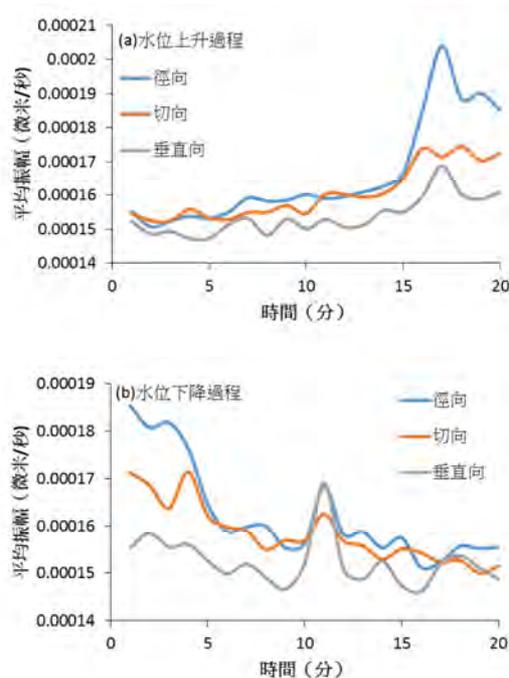


圖 26、三方向的平均振幅比較，(a)水位上升過程、(b)水位下降過程。

二、地震儀是否可以觀察到河水中的石塊搬運

參考資料與理化課本中，提到以往觀察河水中石塊的搬運多是在河流中放置捕捉籠，常常在捕捉籠淤滿後就不能再繼續觀測，而且不能即時得知籠子內土石體積，非常難進行連續的觀察。若能利用地震儀來紀錄石塊在河床上滾動、跳躍或滑動的過程所產生的振動，就能取得更多有關河川中大量土石搬運的資訊。可是，在水流較小的時候，能夠搬運的石塊並不多，體積也不大。因此，往往產生的振動能量很微弱，而不容易傳遞到地震儀。所以本研究僅針對人工放水導致水流較大的狀況，來觀察地震儀的紀錄是否也具有石塊受到水流搬運所產生的振動訊號。

透過比對水位上升與下降過程的平均振幅變化(圖 27)，可以觀察到資料點的時間序列呈現一順時針的排列，這個現象又常被稱為遲滯作用。此現象表示水位上升時的振動能量高於水位下降時，但如果振動能量只來自水流大小，那麼上升或下降過程的振幅變化應該會遵循單一軌跡，而不應該有明顯差異。因此，我們可以大膽的推測在水位上升時，地震儀所記錄到的振動能量不僅僅來自水流，而有其他的振動來源。由於發電廠放水時間為清晨七點，因此地震儀觀測點的附近極少人為活動所產生的振動，所以額外的振動來源極有可能就是石塊在水中搬運所產生的振動。國外也有許多利用地震儀觀測河川水流的研究發現這種遲滯現象，一般也都認為振動是來自水中的土石搬運，但很少探討如何利用這個現象來計算出搬運的石塊多寡。本研究認為，水位下降過程的振幅與流量關係公式可以表達出沒有石塊搬運的單純水流作用，所以利用扣除水流能量的方式，剩下的能量就主要來自石塊搬運了。但是要能估計水中石塊搬運量，仍需要更多直接的觀測資料，本研究只是提出一個可能的應用方向。

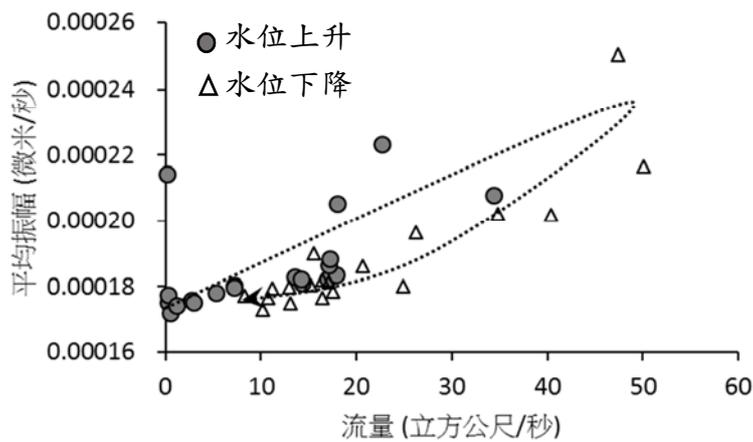


圖 27、平均振幅與流量關係中的遲滯現象

三、未來的應用

雖然第二點討論到地震儀所記錄到的振動訊號可能包含石塊搬運作用產生的振動，會導致振幅大小的來源並不單純只有水流大小，進而影響流量與振幅之間的相關性下降。如圖 28，經過 10~50 赫茲濾波後平均振幅與流量之間的決定係數為 0.67。如果分別考慮水位上升與下降過程的平均振幅與流量之間的相關性，決定係數就大於 0.79，有明顯上升的現象（圖 29 與圖 30）。更能說明本研究觀測的河流可能有石塊搬運所產生的振動存在，而降低平均振幅與流量之間的相關性。不過，若能測試不同頻率範圍的振幅與流量間的相關性，找到相關性最大的頻率區間，適當的排除石塊搬運所產生振動的頻率範圍，那地震儀的紀錄就很有可能被運用於推算河流中的水流多寡，而不只是觀察到水量上升或下降的趨勢而已。透過線性迴歸分析，就可以得到平均振幅與流量間的相關性公式 $y = 878270x - 145$ 。在本研究中，以 10~50 赫茲徑向振動訊號為例，將平均振幅帶入公式中，就可以計算出相對的流量值。我們也大膽的認為如果能在台灣各河流的重要河道附近進行與本研究類似的觀測，並維持一段時間(例如：數個月)，之後只需要安裝簡單的地震儀，就能進行水流大小的觀測，解決過去傳統水流觀測需要依賴橋上的水位計所產生的許多問題。

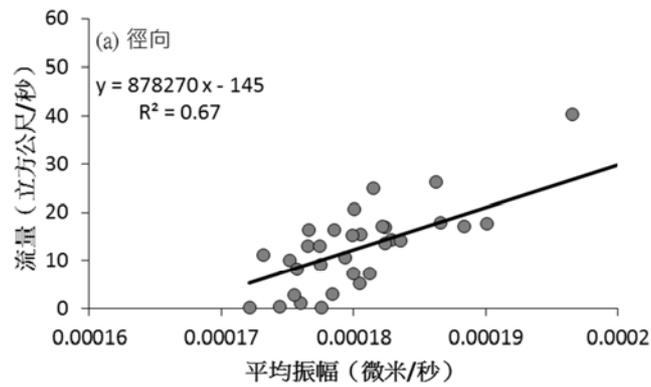


圖 28、10~50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性與線性公式

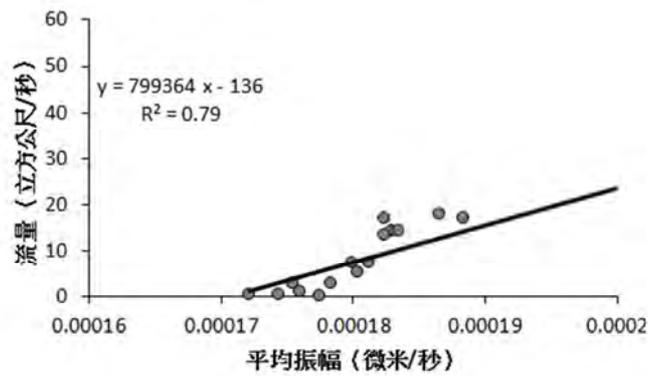


圖 29、水位上升過程 10~50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性與線性公式

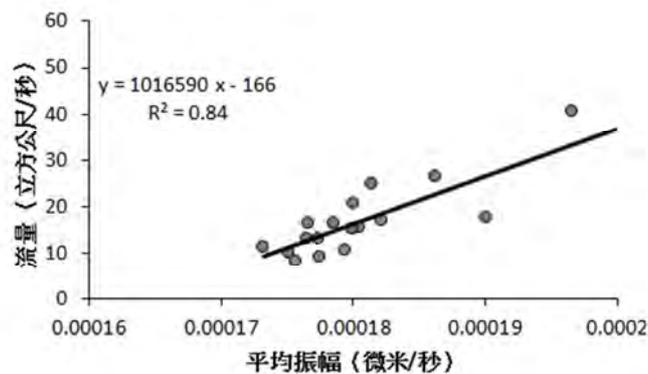


圖 30、水位下降過程 10~50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性與線性公式

柒、結論

傳統的河川水流觀察可能會受到儀器、地理環境等因素影響，而常常無法安裝在更上游的河道或觀測的數量不夠多。河道中水的流動會產生振動，藉由下面的岩石傳遞出去，所以在河流旁若能安裝地震儀，就能即時的測量河中的水流量，甚至石塊被搬運的狀況。本研究就利用曾文水庫水力發電站會固定人工操作河流的水量，在河道旁邊安裝了一個地震儀，測試地震儀應用於觀察水流量是否真的可行。另外，本研究也在附近的橋上拍攝水流的影片，再利用大尺度影像質點速度測量法去計算河水的流量，目的是要與地震儀的紀錄進行比較。各種資料進行分析跟計算後，我們獲得以下六點結論：

- 一、從原始的地震儀紀錄就可以觀察到水流量較大時，有較大的平均振幅，但在小流量時則流量與振幅的關係不明顯。所以地震儀資料要運用於比對水流大小需要透過一些資料的前處理，例如取絕對值與計算平均振幅等。
- 二、沒有經過濾波的地震儀紀錄中可能包含各種來源的振動，而不只有水流而已，所以比對平均振幅與流量雖可以觀察到明顯的正相關，但相關性不高。透過對地震儀紀錄的濾波，頻率 10~50 赫茲的振動紀錄會與流量有較好的相關性，決定係數就會大於 0.6。
- 三、從頻率域來觀察振動紀錄，可以明顯觀察到當水流增加時，10 赫茲以上的振動能量也跟著上升，表示從頻率域也能觀察到地表振動與水流變化的關係。
- 四、比對徑向、切向與垂直向的振動紀錄，以徑向的振幅最大，其次分別是切向與垂直向，說明水流產生的振動主要是以雷利波的方式傳遞至地震儀。
- 五、從水流上升與下降過程的振幅變化軌跡不一致可以證明，地震儀的紀錄中除了水流之外，還包含了其他來源的振動。在排除可能是人為活動的影響後，我們推測水中石塊的搬運是導致水流上升與下降過程的振幅變化軌跡不一致的原因，這個現象一般被稱為遲滯現象。
- 六、頻率 10~50 赫茲的振動紀錄會與流量有較好的相關性，所以藉此得到推估公式就可以應用於估算出河水的流量，有助於改善目前傳統流量觀測的問題。

捌、參考資料及其他

- [1] Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., and Le Coz, J.: Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges, *Hydrol. Process.* 30, 90–105, 2016.
- [2] 郭賢立、林冠璋 (2017) • 地震觀測技術應用於建立邊坡災害警戒雨量之研究 • 中華民國地球物理學會與中華民國地質學會 106 年年會暨學術研討會論文集。
- [3] 國中自然與生活科技第三冊 • 新北市：康軒。
- [4] 國中自然與生活科技第三冊 • 臺南市：翰林。

【評語】 030502

本研究測試地震儀應用於觀察水流水量是否可行，並拍攝水流影片，再利用大尺度影像質點速度測量法計算流量，目的要與地震儀紀錄做比較。利用震動來估算河水流量，有足夠好奇心。但研究使用的工具包含尺度影像質點速度測量法(LSPIV)，時頻分析都是比較複雜而間接的工具，使用上比較困難，作者對其理解有限，將來可再加強。

壹、研究動機

2018年8月23日在台灣南部降下豪雨，導致多處淹水和土石流等災情，引發我們對於如何加速觀察洪水事件的發生過程產生興趣。除了透過傳統的方法觀測河川水流之外，我們想要了解地震儀是否也可以應用於觀察河水流量和河水中搬運的土石。

貳、研究目的

- 一、了解地震儀是否可以記錄到河水變化。
- 二、利用地震儀紀錄計算出河水流量。
- 三、了解地震儀是否可以記錄到河水中石塊的搬運。

參、研究設備及器材

本研究主要使用的儀器有四項：地震儀(包含三軸地聲計、記錄器、機車電池、太陽能板)、數位相機、Garmin手持式GPS、大疆Phantom 4 Pro空拍機，以及其他輔助的測量器材。



圖1 研究設備儀器



肆、研究過程或方法

為了了解河流中水量的變化是否也會產生不同程度的地表振動，研究需要河流的流量以及地震儀的紀錄資料。其中河流的流量是使用大尺度影像質點速度測量法(LSPIV)進行分析獲得，而地表振動是利用安裝在河道旁的地震儀來進行觀測(圖2)。我們選定的研究地點為曾文水庫下游的水力發電廠放水口附近的河道，此處有人工放水造成的小型洪水(圖3)。

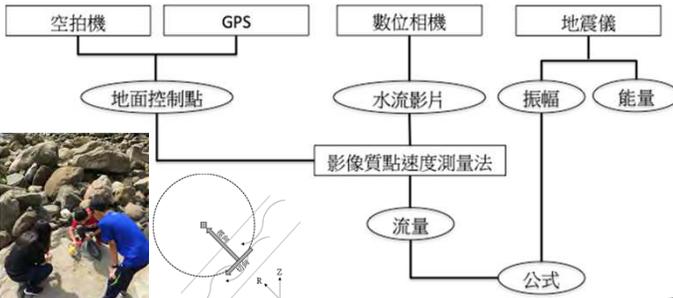


圖2 研究流程圖



圖3 水流最小(上)及最大時的影像(下)



圖4 架設於曾文五號橋上的數位相機

一、大尺度影像質點速度測量法(LSPIV)是利用連續拍攝的兩張照片間(圖4)，分析裡面各個像素的相關性，來計算出質點的移動方向和距離(圖5)。

二、地震儀紀錄分成三個方向(垂直向、切向與徑向)(圖6)。記錄分析分為時間域的振幅分析，以及頻率域的頻譜分析。在振幅分析部分，先將地震儀紀錄取絕對值，再分別計算每一分鐘內的平均值。頻譜分析部分是將地震儀紀錄透過傅立葉轉換為頻率域資訊。

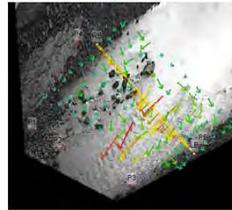


圖5 LSPIV表面流速分析結果示意圖，黃色點線為河道剖面線

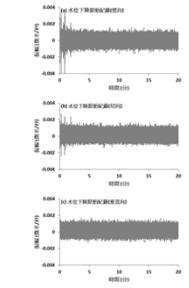


圖6 地震儀原始記錄

伍、研究結果

一、河水的流量

從發電廠關水的過程中得知，水位最高時，平均流量為50.085立方公尺/秒(圖7)；水位最低時，平均流量為8.268立方公尺/秒。水位下降的過程歷時約20分鐘。放水的過程則從平均流量為0.246立方公尺/秒，上升至平均流量為36.237立方公尺/秒(圖8)。本研究計算得到的最大流量與發電廠公布的發電用水量大致相同。

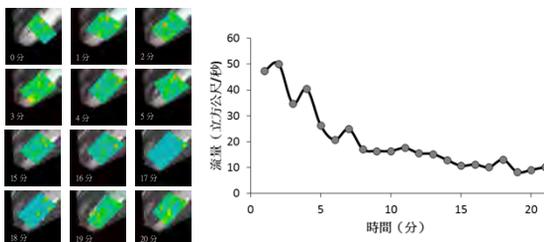


圖7 水位下降過程LSPIV分析結果與流量變化

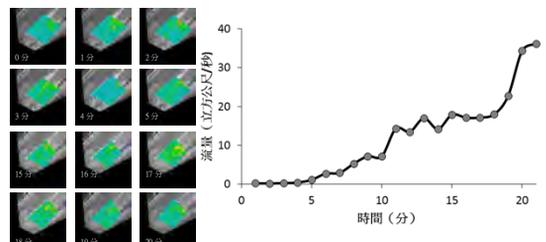


圖8 水位上升過程LSPIV分析結果與流量變化

二、時間域的地震紀錄

比對流量與每分鐘平均振幅(圖9)，可以觀察到流量與平均振幅之間有著明顯的正相關，水平方向的決定係數高於垂直向。為了縮小振動能量可能的來源，我們將地震儀紀錄進行了濾波，發現10~50赫茲的振動紀錄與流量之間的相关性高於不濾波時的決定係數。比較10~50赫茲的振動紀錄的水平向平均振幅與流量，就可以觀察到兩者間的明顯正相關，決定係數也有上升的狀況(圖10)。

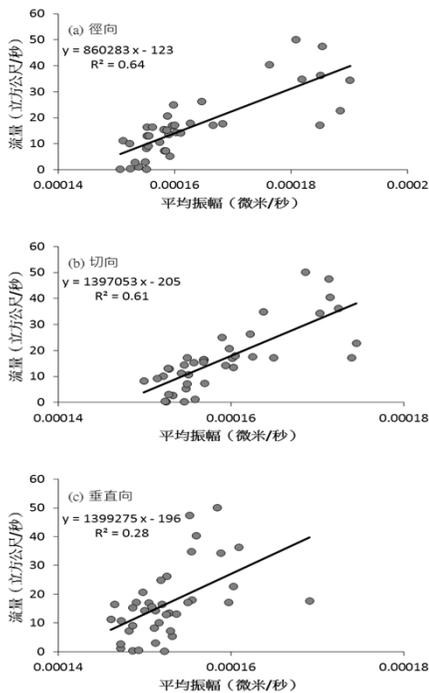


圖9 振動訊號的平均振幅與流量的相關性

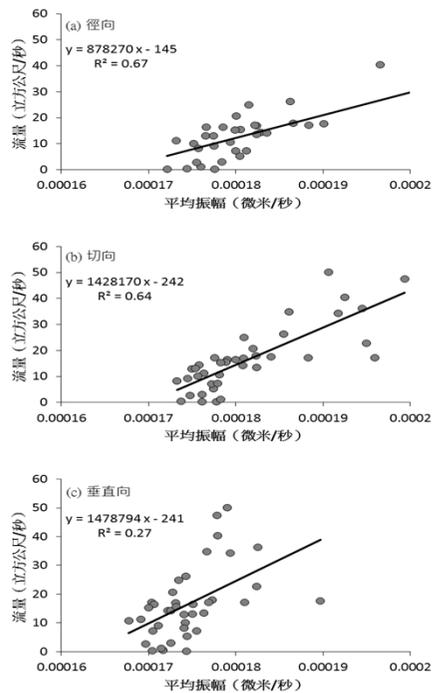


圖10 10至50赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性

三、頻率域的地震紀錄

將水位上升和下降過程中分別的20分鐘地震儀紀錄轉換為時間與頻率關係(圖11及圖12)，我們可以發現隨著水流改變，時頻圖中的能量分布也發生改變。

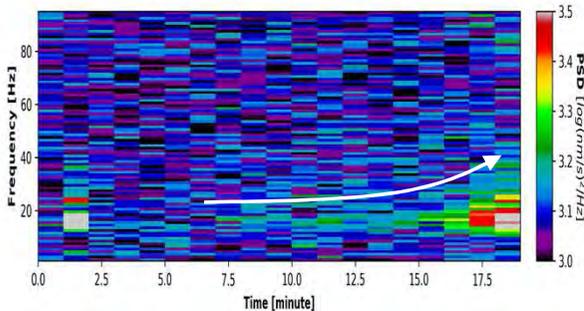


圖11 水位上升過程的時頻圖

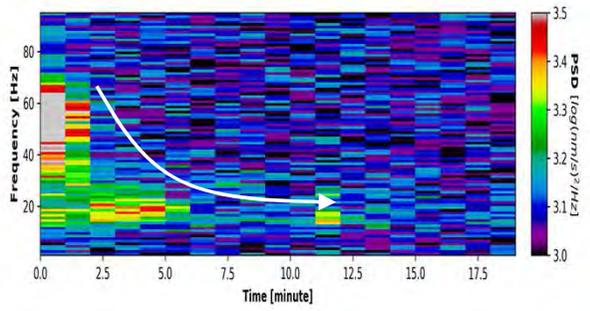


圖12 水位下降過程的時頻圖

陸、討論

一、河水產生的振動如何傳遞到地震儀

從圖13中可以觀察到不論是水位上升或下降，徑向的平均振幅都大於切向與垂直向，而垂直向則是最小。因此，我們推論河水產生的振動最主要以雷利波的方式傳遞至地震儀，其次才是樂夫波。

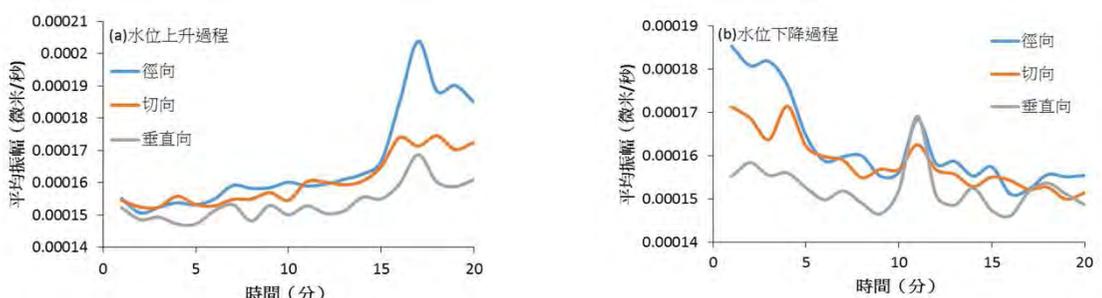


圖13 三方向的平均振幅比較，(a)水位上升過程、(b)水位下降過程

二、地震儀是否可以觀察到河水中的石塊搬運

透過比對水位上升與下降過程的平均振幅變化(圖14)，可以觀察到資料點的時間序列呈現一順時針的排列，此現象表示水位上升時的振動能量高於水位下降時。但如果振動能量只來自水流大小，那麼上升或下降過程的振幅變化應該會遵循單一軌跡，而不應有明顯差異。因此，我們推測在水位上升時，地震儀所記錄到的振動能量不僅僅來自水流，而有其他的振動來源。

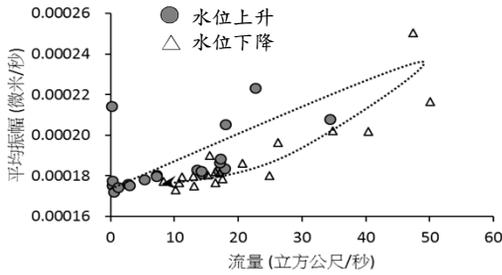


圖14 平均振幅與流量關係中的遲滯現象

三、未來的應用

濾波後10~50赫茲平均振幅與流量之間的決定係數為0.67(圖15)。如果分別考慮水位上升與下降過程的平均振幅與流量之間的相關性，決定係數就大於0.79，有明顯上升的現象(圖16與圖17)。透過線性迴歸分析，就可以得到平均振幅與流量間的相關性公式： $y = 878270x - 145$ 。在本研究中，以10~50赫茲徑向振動訊號為例，將平均振幅帶入公式中，就可以計算出相對的流量值。

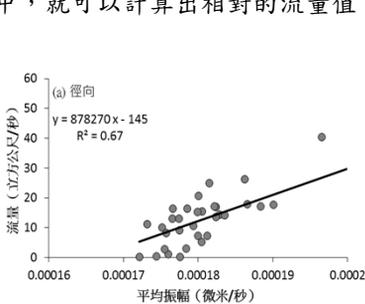


圖15 10~50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性與線性公式

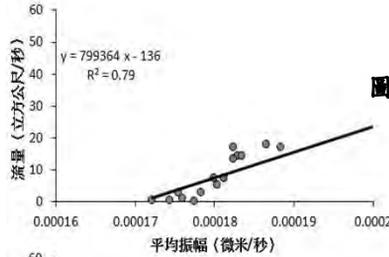


圖16 水位上升過程10~50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性與線性公式

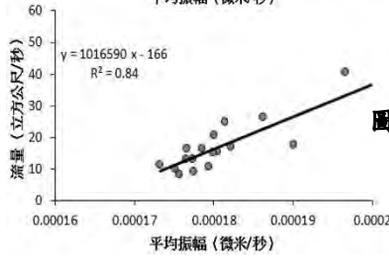


圖17 水位下降過程10~50 赫茲振動訊號的平均振幅與流量的相關性與線性公式

柒、結論

本研究利用曾文水庫水力發電站會固定人工操作河流的水量，在河道旁邊安裝了一個地震儀，測試地震儀應用於觀察水流水量是否真的可行。另外，本研究也在附近的橋上拍攝水流的影片，再利用大尺度影像質點速度測量法去計算河水的流量，目的是要與地震儀的紀錄進行比較。各種資料進行分析跟計算後，我們獲得以下六點結論：

- 一、從原始的地震儀紀錄就可以觀察到水流量較大時，有較大的平均振幅，但在小流量時則流量與振幅的關係不明顯。所以地震儀資料要運用於比對水流大小需要透過一些資料的前處理，例如取絕對值與計算平均振幅等。
- 二、沒有經過濾波的地震儀紀錄中可能包含各種來源的振動，而不只有水流而已，所以比對平均振幅與流量雖可以觀察到明顯的正相關，但相關性不高。透過對地震儀紀錄的濾波，頻率10~50赫茲的振動紀錄會與流量有較好的相關性，決定係數就會大於0.6。
- 三、從頻率域來觀察振動紀錄，可以明顯觀察到當水流增加時，10赫茲以上的振動能量也跟著上升，表示從頻率域也能觀察到地表振動與水流變化的關係。
- 四、比對徑向、切向與垂直向的振動紀錄，以徑向的振幅最大，其次分別是切向與垂直向，說明水流產生的振動主要是以雷利波的方式傳遞至地震儀。
- 五、從水流上升與下降過程的振幅變化軌跡不一致可以證明，地震儀的紀錄中除了水流之外，還包含了其他來源的振動。在排除可能是人為活動的影響後，我們推測水中石塊的搬運是導致水流上升與下降過程的振幅變化軌跡不一致的原因，這個現象一般被稱為遲滯現象。
- 六、頻率10~50赫茲的振動紀錄會與流量有較好的相關性，所以藉此得到推估公式就可以應用於估算出河水的流量，有助於改善目前傳統流量觀測的問題。