
利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型(2)
Validation of seismic bedload saltation
model based on field experiment(2)
(成果報告書)

執 行 單 位：國立陽明交通大學

執 行 期 間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：趙韋安 副教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型(2)

摘要

第一年計畫成果摘要條例如下: (1)本計畫可透過試驗成果改良震波推移質跳躍模型(機率式與非垂直撞擊作用之震波躍移物理模型), 可產生具有較高可信度且連續性的河床載觀測資料; (2)針對實際野外大型試驗場, 開發簡易式主動式震源敲擊試驗與被動式表面波分析法, 可快速計算震波波傳路徑衰減特性參數(報告書中的係數 $C_2 \sim C_5$); (3)開發自制式六軸感測之礫石粒子追蹤器(又稱之為智能球, smart rock), 可以提供泥砂運移軌跡、撞擊作用力時序資料, 亦可以直接提供泥砂顆粒躍移時的運動及力學參數(C_1 、 U_b 、 t_b 、 L_b 、 w_i 、Shields stress); (4)自行開發現地型手持式粒徑掃描儀(RPiGS-Scanner)應用於試驗場址的表面粒徑調查。本年度持續進行渠槽智能顆粒躍移試驗, 透過相關室內試驗測試成果, 並規劃野外大型渠道試驗之儀器配置及泥砂觀測。本年度關鍵感測器測試將聚焦於「分散式光纖感測器(Distributed Acoustic Sensing, DAS)應用於河川水砂作用之初探」; 另外, 前一期聚焦觀察泥砂躍移作用, 本期將一併探究泥砂顆粒之滾動或滑動作用過程對於微地動訊號生成之影響, 並討論其相對於河床載作用之關聯性。本年度選定惠蓀林場的蘭島溪惠蓀二號橋作為實驗渠道區域。試驗區天然蜿蜒渠道長約30公尺, 坡度平均為 4° 且渠道斷面為梯形堰,

底床寬為 2 公尺、頂寬為 3.8 公尺、深度約為 1 公尺，最大通洪斷面積約為 2.9 平方公尺。

本研究總共架設了兩個與河道平行及一個垂直於水流方向的微地動感震器陣列。試驗期間直接測量的參數包括水深、河道幾何形狀、底床地形高程變化以及試驗期間的攝影測量來決定表面流速。在試驗渠道凹岸區域因受到沖刷作用，河道於試驗後有加寬加深之現象，由梯形堰變成矩形堰，底床刷深約 0.2 公尺、側向侵蝕約為 0.5 公尺，試驗期間之表面流速約為 2.7m/s，水深約為 0.8 公尺，流量約為 6 cms。關於泥砂顆粒運動行為，本研究自製智能球量測數據顯示於試驗渠道中進行了 8 次撞擊，平均躍移速度約為 1.5m/s。關於泥砂粒徑分佈，本研究期中先進行了測試一系列基於 RGBD 深度圖像及深度學習模型的卵石顆粒粒徑掃描法(稱之為 AI-RPiGS-Scanner)，以快速且精確調查試驗河床表面的泥砂顆粒粒度分佈曲線資料，並應用於試驗前後底床粒徑分佈之調查，結果顯示試驗前的代表中位粒徑 D_{50} 介於 10mm 至 12mm 之間，其皆小於試驗後的 D_{50} ，渠道底床不同位置之 D_{50} 介於 15mm 至 22mm 之間。

本研究進一步選擇野外河床灘地區域測試主/被動表面波震測法來獲得地震波衰減和傳播特性參數，並於試驗後進行 20 次渠道底床敲擊試驗，結果顯示敲擊作用主要可產生頻率範圍為 20Hz 至 100Hz

之功譜密度值 PSD(Power Spectral Density)，且能量強度隨著波傳距離增加亦有顯著衰減現象。野外渠道試驗之時序監測資料微地動訊號顯示於凹岸沖刷及泥砂淤積處之測站 PSD 有顯著的時頻差異存在，於凹岸沖刷測站具有較強的 PSD 能量且頻率範圍較為寬廣，主頻範圍約為 20Hz 至 80Hz，其與敲擊試驗的時頻成果呈現一致性，本研究推測其為河床質躍移作用造成的主頻率特性；光纖記錄顯示在上游水流抵達至試驗區域時可造成約 10^{-5} 之應變率。

本研究於本年度 10 月 20 日完成野外渠道試驗，並成功測試高空間解析度之 DAS 感測器、新型便攜式微地動感測器(SmartSolo)、機器學習式現地型手持式粒徑掃描儀(AI-RPiGS-Scanner)、泥砂顆粒智能球(smart rock)等設備，並以特性分析資料特徵為主，後續將持續擬提「利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型(3)」第三期計畫申請書，預計完成第二期時序資料與調查成果的定量分析。期望最終得以有效提升震波式推移載分析技術在河川推移載量測上的應用價值。

關鍵詞：震波推移質跳躍模型、智能球、分散式光纖感測器、RGBD 深度圖像、深度學習模型

Validation of seismic bedload saltation model based on field experiment(2)

Abstract

We first summarized the first-year project achievements as follows:

1. The project has improved the seismic wave propagation and particle saltation model (probabilistic and non-vertical impact seismic saltation physical model) based on laboratory experimental results. This enhancement generates river bedload observation data with higher credibility and continuity.
2. For large-scale field experiments, a simplified active seismic source impact test and passive surface wave analysis method have been developed. These methods enable rapid estimation of parameters related to seismic wave propagation path and seismic attenuation characteristics (see coefficients $C_2 \sim C_5$ mentioned in this report).
3. A custom-made six-axis sensor gravel particle tracker (also known as smart rock) has been developed. It provides trajectories of sediment particles, impact force timeseries, and direct mechanical parameters of sediment particle saltation (associated with coefficients C_1, U_b, t_b, L_b, w_i , Shields stress).
4. A portable particle size scanner (RPiGS-Scanner) has been developed for surface particle size surveys at experimental sites.

Throughout this year, intelligent saltation laboratory flume experiments in channels have continued. Based on relevant laboratory testing results, monitoring instrumentation setups and sediment observations for large-

scale field channel experiments are being planned. Key sensor tests this year will focus on the "application of distributed acoustic sensing (DAS) for river bedload measurement". Additionally, while the previous study focused on observing sediment saltation, this year will explore the effects of sediment particle rolling or sliding processes on the generation of micro-seismic signals, discussing their correlation with river bedload behavior. This year's planned field experiment site is Landao River in Huisun Forest Area. The artificial channel segment considered measures 30 meters in length, with an average slope of 4° , a bottom width of 2 meters, a top width of 3.8 meters and a channel depth of 1 meter. The maximum flood flow cross-sectional area is approximately 2.9 square meters.

This study deployed two micro-seismic sensor arrays parallel to the river channel and one array perpendicular to the flow direction. The parameters directly measured during the experiment included water depth, channel geometry, changes in the bed topography, and surface flow velocity determined through photogrammetry during the test period. In the concave bank area of the experimental channel, due to scouring, the channel was widened and deepened after the experiment, changing from a trapezoidal weir to a rectangular weir. The bed was eroded by about 0.2 meters, and lateral erosion was approximately 0.5 meters. During the field experiment period, the surface flow velocity was about 2.7 m/s, the water depth was approximately 0.8 meters, and the flow rate was about 6 cms. Regarding the movement of sediment particles, data from custom-made smart rocks showed that 8 impacts occurred along the experimental channel, with an average jump velocity of about 1.5 m/s. Regarding distribution of sediment

particle size, this study first conducted a series of tests using an RGBD depth image-based scanning method and a deep learning model for pebble particle size (referred to as AI-RPiGS-Scanner) to quickly and accurately survey the sediment particle size distribution on the riverbed surface. This method was applied to investigate the bed particle size distribution before and after the experiment. The results showed that the representative median particle size (D_{50}) before the experiment ranged between 10 mm and 12 mm, all of which were smaller than the D_{50} values measured after the experiment. After the experiment, the D_{50} of the bed material at different locations in the channel ranged from 15 mm to 22 mm.

This study further selected a field riverbed sandbar area to test both active and passive surface wave seismic methods to obtain seismic wave attenuation and propagation characteristic parameters. After the experiment, 20 channel bed impact tests were conducted. The results indicated that the impact primarily produced power spectral density (PSD) values within a frequency range of 20 Hz to 100 Hz, with energy intensity significantly attenuating as the wave propagation distance increased. The time-series monitoring data from the field channel experiment showed notable time-frequency differences in the microseismic signals at stations located in the concave bank scour and sediment deposition areas. The PSD at the concave bank scour station exhibited stronger PSD energy and a broader frequency range, with a dominant frequency range of approximately 20 Hz to 80 Hz. This was consistent with the time-frequency results from the impact tests. The study hypothesizes that this dominant frequency characteristic is caused by the bed material jump displacement

effect. Fiber optic records showed that when the upstream flow reached the test area, it caused a strain rate of approximately 10^{-5} .

On October 20 of this year, the field channel experiment was completed, and several high-spatial-resolution devices were successfully tested, including the DAS sensor, a new portable microseismic sensor (SmartSolo), a machine learning-based handheld particle size scanner (AI-RPiGS-Scanner), and smart sediment particles (smart rocks). The primary focus was on feature analysis of the collected data. Moving forward, the study will continue to prepare the third-phase project proposal titled " Validation of seismic bedload saltation model based on field experiment (3)", and is expected to complete a quantitative analysis of the second-phase time-series data and investigation results. The final goal in this study is to effectively enhance the application ability of seismic saltation techniques in riverine sediment bedload measurement.

Keywords: seismic bedload saltation model, smart rock, distributed acoustic sensing (DAS), RGBD depth image, deep-learning model

目次

摘要.....	I
ABSTRACT.....	IV
目次.....	VIII
表次.....	X
圖次.....	XI
第一章 緒論.....	1-1
第二章 工作執行與方法步驟	2-1
第一節 方法介紹	2-1
第二節 試驗監測儀器介紹	2-19
第三節 試驗規劃彙整與震波模型初探	2-22
第三章 工作執行成果	3-1
第一節 室內渠槽試驗成果	3-1
第二節 分散式光纖感測器測試與分析方法建立	3-6
第三節 主被動表面波震測法施作測試	3-10
第四節 新式 RGBD 深度影像之粒徑分析法	3-12
第五節 自記式野外水聲計設計	3-15
第六節 野外渠槽試驗成果	3-16

第四章 工作進度與交付項目	4-1
第一節 計畫甘特圖	4-1
第一節 計畫交付項目	4-1
第五章 結論及建議	5-1
第一節 結論	5-1
第二節 建議	5-2
參考文獻.....	附-1
附錄、期末報告審查意見及意見回覆	附-6
附錄、期中書面審查意見及意見回覆	附-11
附錄、計畫內容審查意見及意見回覆	附-23

表次

表 1 實驗監測、調查與工程施作設備	2-30
表 2 計畫重要檢核點管制表	4-3

圖次

圖 1	水位與功譜密度季節性的遲滯現象	1-4
圖 2	不同粒徑分佈之預測功譜密度分佈曲線	1-4
圖 3	濁水溪張雲大橋監測場址	1-6
圖 4	卡努颱風期間之(A)水深與功譜密度時頻圖、(B)河床載通量及 (C)河床載累積體積量體	1-7
圖 5	卡努颱風期間之觀測與合成理論功譜密度時頻圖	1-8
圖 6	MASW 及一維速度反演分析方法流程	2-12
圖 7	雷利波倒退式橢圓軌跡與向量	2-13
圖 8	被動式表面波分析法流程	2-13
圖 9	影像法粒徑分析流程	2-15
圖 10	自製顆粒碰撞感測器	2-18
圖 11	透過多台攝影機建置表面流速示意圖	2-21
圖 12	本計畫自製水聲計	2-22
圖 13	室內渠槽試驗規劃及配置圖	2-24
圖 14	三種不同密度之智能泥砂顆粒	2-25
圖 15	實驗場地配置圖	2-29
圖 16	試驗調查與儀器配置示意圖	2-29
圖 17	單顆智能球之平均 PSD 時序與時頻圖	3-3

圖 18	水聲紀錄時頻圖與智能球加速度時序	3-3
圖 19	6 顆智能球試驗之平均 PSD 時序與時頻圖	3-4
圖 20	單顆智能球試驗之平均 PSD 及加速度時序資料與水聲計時頻 圖	3-5
圖 21	PHASENET-DAS 挑波器分析示意圖	3-8
圖 22	中央氣象署地震案例之 PHASENET-DAS P-WAVE 及 S-WAVE 挑 波成果	3-9
圖 23	非中央氣象署地震案例之 PHASENET-DAS P-WAVE 及 S-WAVE 挑波成果	3-9
圖 24	試驗之撞擊、微地動儀器位置示意圖	3-11
圖 25	儀器規格尺寸及測線施作示意圖	3-11
圖 26	RGB-D 相機與對齊校正前後影像	3-13
圖 27	顆粒粒徑擬合比較結果	3-13
圖 28	粒徑擬合成果比較	3-14
圖 29	水聲計設計示意圖	3-15
圖 30	試驗區儀器配置與調查點位分布情形	3-17
圖 31	七個試驗階段與情境照片	3-18
圖 32	RPIGS-SCANNER 野外調查流程表	3-20
圖 33	試驗前渠道底床粒徑調查成果	3-21

圖 34	試驗前後底床沖淤變化	3-22
圖 35	試驗後粒徑分析成果	3-22
圖 36	IM01、IM16 及 IM20 堆積處之粒徑曲線分析成果	3-23
圖 37	IM09 凹岸沖刷處之粒徑曲線分析成果	3-24
圖 38	野外試驗用之智能球	3-28
圖 39	上游蓄水區水位(藍色)、智能球加速度時序(紅色)及時頻圖.	3-30
圖 40	上游蓄水區水位(藍色)、溫度差異(紅色)及時頻圖	3-31
圖 41	上游蓄水區水位(藍色)、溫度差異(紅色)及時頻圖	3-32
圖 42	試驗前之光纖紀錄	3-33
圖 43	上游水源抵達熔接點處之光纖紀錄	3-34
圖 44	IM11 敲擊試驗之時頻圖成果	3-36
圖 45	IM08 敲擊試驗之時頻圖成果	3-36
圖 46	計畫甘特圖	4-1

第一章 緒論

河川泥砂的運移行為將影響河道地形的變遷、河床的沖淤，以及河川生態發展的重要因子，根據泥砂的運動行為機制主要可以分為懸浮質以及推移質，前者主要懸浮於水體中，粒徑大小約小於毫米(mm)尺度，與河床並沒有實體的接觸作用；後者的運動機制主要以滑動(sliding)、滾動(rolling)，以及跳躍(saltating)為主，粒徑的大小可達數公分至數十公分，運動的過程中皆與河床產生接觸，但推移質的運動僅會在底床剪力速度(bed shear velocity, u^*)大於泥砂顆粒的運移起動臨界值時才會開始產生運移。因此，推移載主要出現在颱風期間，其運移作用往往會影響橋樑、河堤以及鄰近河道結構物的穩定性，所以如何計算推移載(bedload)於時間序列上量體的變化，對於河道以及近河道水工結構物的安全性而言至關重要。

過去推移載量體的現地量測，主要皆在河道內施作(接觸型)，可以分為直接測量與間接測量兩種方式：(1)直接測量：以採樣器和囚砂坑為主，採樣器的量測概念，為利用前方為開口式的型態，於颱風期間下放至河床中，藉以收集於河床上運移之推移質，針對不同粒徑大小之推移質，有不同之採樣器，另如：Helley-Smith sampler 適用之粒徑範圍為 0.25mm~76.2mm (Delf, 1996)，而 USFS Bedload trap 適用之粒徑範圍則為 4mm~90mm (Bunte et al., 2004)，這些採樣器除了大小與形狀略有差異以外，其設計原理與操作概念皆相似，主要都在颱風期間以手持或鋼索懸吊的方式來進行施作。但是，這種方式難以提供穩定且即時的時序推移載資料，且操作的限制較大。為了解決操作不便的問題，也發展出固定於河床的採樣器，其優點可在颱風前先放置

河床上，量測的容量可以較大，量測的時間可以較久，但缺點在於設置後無法輕易移動，且需設置於較平坦的地形。另外，因砂坑與固定底床的採樣器相似，於颱風前挖坑洞，可於坑洞的底部設置壓力計，利用時序的壓力變化來換算坑洞內推移載的質量，以解決採樣器無法提供完整時序資料的問題，但其缺點在於因砂坑會影響河床局部的流場，因此，並無法設置過大的因砂坑，而於臺灣這種泥砂供應源充足的河川條件，往往難以記錄到整場颱風之推移載的量體。(2)間接測量：以聲學式的儀器為主，其量測概念為將儀器架設於震動管中，當推移載運移時會撞擊震動管，聲學式的儀器會接收到撞擊時所產生的聲波，藉由與實測的推移載資料率定建立關係式後，便可運用來計算時序之推移載的量體，該儀器的架設主要可垂直於水面，架設於橋墩上，或者可以沿著河道的斷面進行架設，但該儀器的缺點在於颱風事件中大量的推移載運移撞擊震動管，容易使得震動管產生損壞無法修復，可能僅記錄到部分事件之資料，另外，聲學式的儀器常常會跟根據不同的場址特性，而具有未知的高估或低估的狀態產生。

上述在河道現地內量測推移載的方式具有操作不易、無法提供穩定的觀測資料以及易損壞等問題，為了解決上述實際量測問題，近年來地動感震器的快速發展促使在河川兩側的河岸架設之微地動觀測儀逐漸應用於推移載量體的監測，由於微地動觀測儀實屬於非接觸型(remote sensing)的監測手段，因此，具有維護容易、不易損壞且能提供穩定的觀測資料的特性。在尚未有完整的震波物理模型出來之前，微地動分析僅能展現定性之描述分析，例如：微地動訊號之功譜密度(power spectral density, PSD)在颱風期間與水文時序資料間呈現順(逆)磁滯之曲線(Burtin et al., 2008; 圖 1)。直到 2012 年，基於推移質跳躍

撞擊河床產生雷利波(Rayleigh wave)的物理模型被建立出來後(Tsai et al., 2012)，微地動分析技術便可以根據時序的微地動觀測數據來定量推移載通量(bedload flux, q_b)，但該模型無法分離颱風期間河水紊流作用過程中產生的 PSD 貢獻，因此在推移載通量的計算可能會有錯誤估計的狀況。直到 2014 年，紊流作用所產生微地動訊號模型也被完善建制後(Gimbert et al., 2014)，微地動技術已可以同步的考慮紊流作用與推移載運移所產生的綜合 PSD 效應。上述震波物理模型需要仰賴三大類的重要參數，包括(1)現地觀測參數：水深、河道寬、河床坡度、泥砂顆粒密度，以及水的密度；(2)震波格林函數(Green' s function)計算參數：雷利波相速度、雷利波群速度(頻散曲線)、參考頻率 1Hz 之雷利波相速度、震波品質因子(Seismic quality factor)，以及振幅係數(amplitude coefficient)；(3)泥砂粒徑參數：河床及推移質泥砂之中位粒徑 D_{50} 大小以及粒徑分布曲線之幾何標準差。過去震波物理模型經過大型實驗室水槽實驗(Gimbert et al. 2019)以及真實颱風事件中的應用後(Chao et al., 2015; Bakker et al., 2020)，發現推移質的粒徑分佈主導了模型的 PSD 輸出成果，特別對於大粒徑的推移質有高度的敏感度($PSD \sim D^3$)，使得計算出來的推移載通量主要受控於大粒徑料源多寡之影響(Tsai et al., 2012; Lagarde et al., 2020; 圖 2)。另外，格林函數(Green' s function)計算參數的誤差亦會提高推移載預估值的不確定性。因此，若能有效控制泥砂粒徑的調查資料及格林函數計算參數，將有助於提升該震波物理模型之預估推移載的準確度。

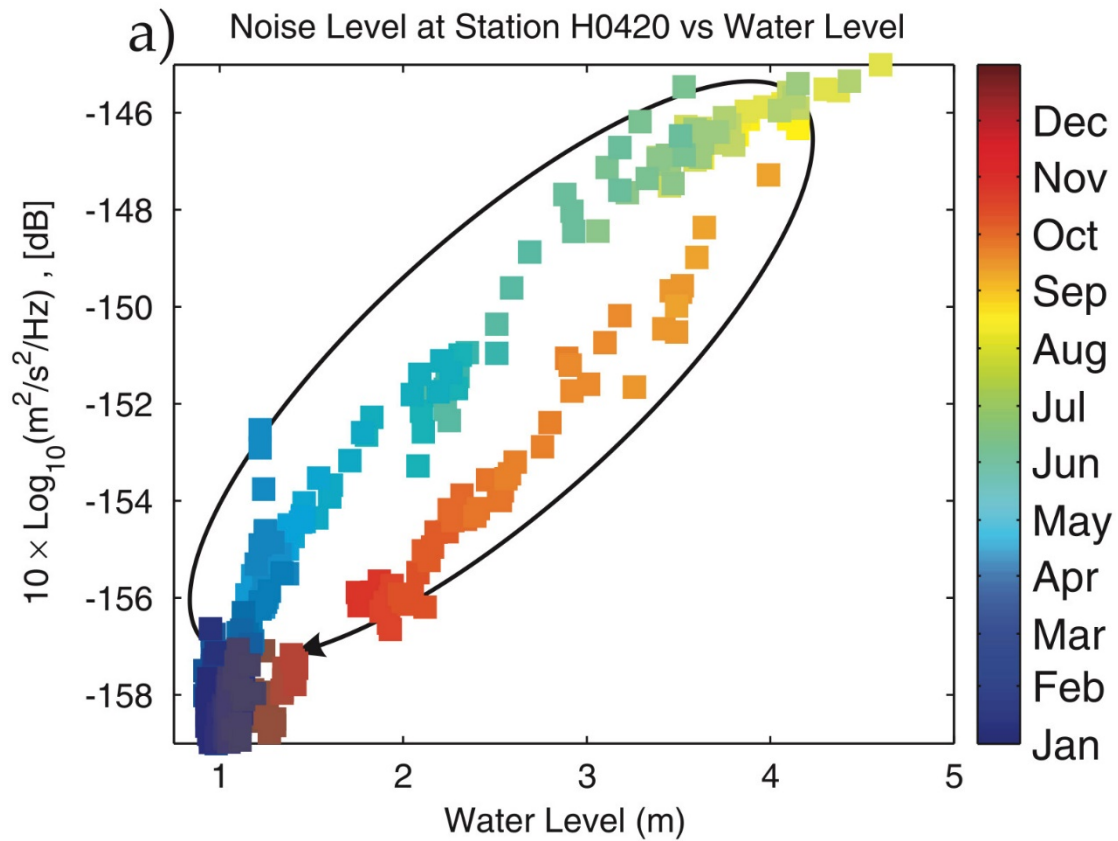


圖 1 水位與功譜密度季節性的遲滯現象

(Burtin et al., 2008)

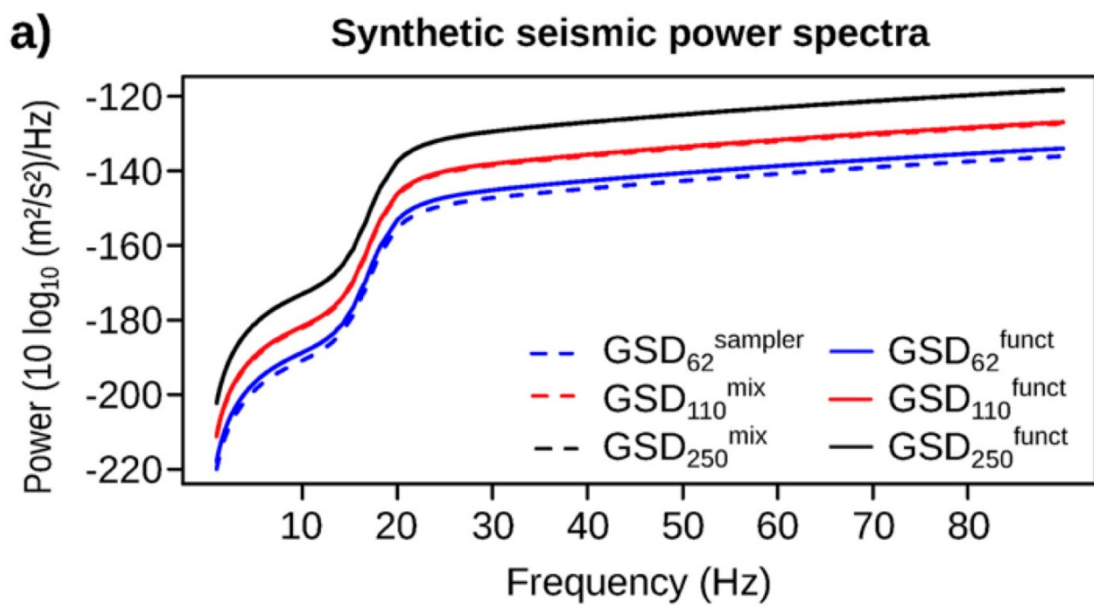


圖 2 不同粒徑分佈之預測功譜密度分佈曲線

(Lagarde et al., 2021)

針對泥砂顆粒粒徑的調查方式本研究將會採用「影像式自動化表面粒徑掃瞄法」及「樣坑式河床質採樣法」；量測泥砂方法將採用 USFS 型採樣器及土砂運移顆粒感測器(本研究自組測試開發，智能球，smart rock; 詳見第一節方法介紹之 5.泥砂觀測)。關於震波式躍移物理模型的格林函數參數，本研究亦直接應用主動式震源震波試驗及被動式表面波分析法來計算得試驗場址之相關震波參數(C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 ; 詳見第二章第一節方法介紹之 1.震波式推移質跳躍模型)，預期將可有效降低模式輸入參數之不確定性。

根據本研究團隊蒐集國內外文獻資料，震波物理模型雖已有應用於野溪河川的案例，但是無論是透過直接量測或間接量測，因野外的自然條件限制下，大多無法取得全洪程的推移載資料，導致震波式推估的推移載難以獲得直接的驗證，至今震波模型尚未經過可控制之野外現地的實驗場址進行驗證及可行性評估。經濟部水利署「中央管河川自動化土砂量測技術之發展應用」計畫執行選定濁水溪彰雲大橋斷面安裝自動化泥砂濃度計、水位計、流速儀、震波土砂觀測站，並於汛期期間進行 ADCP 剖面流速量測，非汛期期間進行河床質粒徑調查與正射影像建置等工作(圖 3)，透過上述水文、地文及泥砂資訊配合震波式物理模型，可進行推估全洪程推移載通量資料。以 2023 年 8 月卡努颱風期間的監測資料為例(圖 4A)，觀測期間最高水深 3.73m 發生於 8 月 4 日晚上 6 點，其對應之頻率範圍 5~40 Hz 的平均功譜密度值 PSD 為 -122.385 dB(圖 4B; 本計畫 Power Spectral Density, PSD; 物理量單位: $(\text{m/s})^2/\text{Hz}$, 將物理量取底數為 10 的對數值, 再乘以 10 倍為物理量單位 dB)，最大推移載通量 $0.00353 \text{ m}^2/\text{s}$ (q_b) 發生於 8 月 4 日晚上 8 點，若假設臨近測站之主要流路的平均河寬為 100 m，則全

洪程期間通過測站斷面的推移載量體為 $11,289.7 \text{ m}^3$ 。圖 5 顯示觀測功譜密度時頻圖、以震波物理模型計算合成理論功譜密度時頻圖(三種情境: 紊流作用、推移載跳躍作用、合併紊流與推移載跳躍作用), 可以觀察到必須同時考慮紊流與推移載跳躍作用物理模型相對擬合觀測時頻圖。



圖 3 濁水溪張雲大橋監測場址

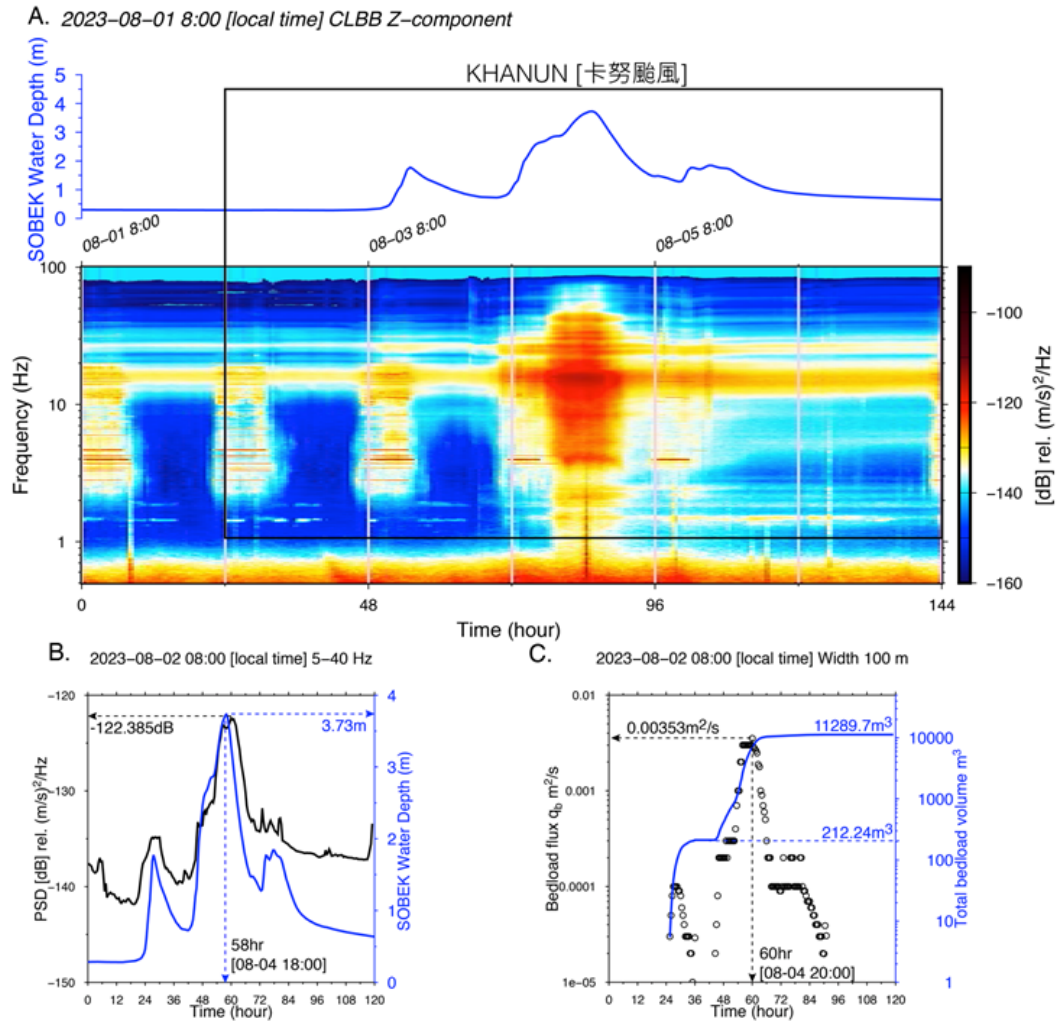


圖 4 卡努颱風期間之(A)水深與功譜密度時頻圖、(B)河床載通量及
(C)河床載累積體積量體

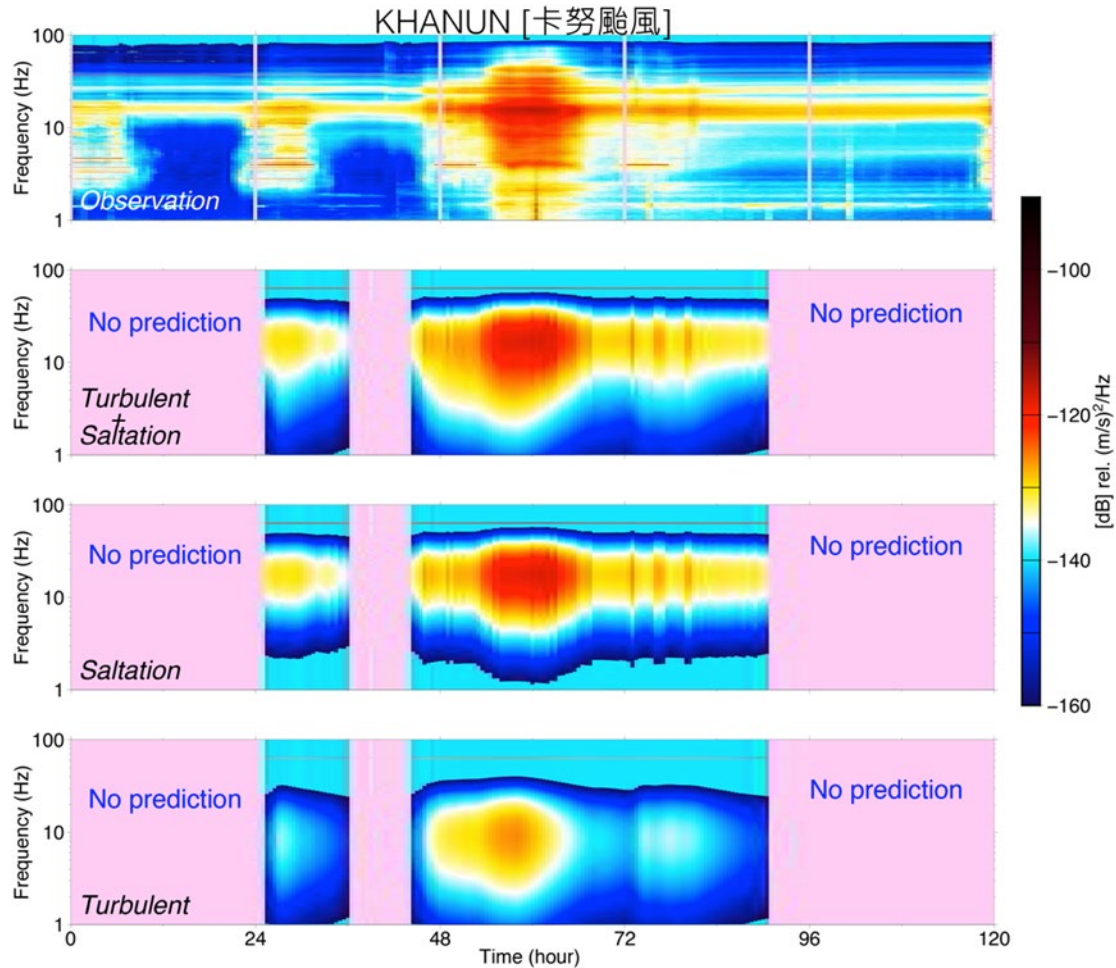


圖 5 卡努颱風期間之觀測與合成理論功譜密度時頻圖

本計畫將暫定考慮於蘭島溪整理大型試驗河道來驗證推移載通量預估之震波物理模型的適用性，預計進行的試驗規劃及相關調查與量測儀器配置條列如下：(1)進行河道整理，控制河道寬度、河床坡度及底床泥砂粒徑分布，(2)進行主動震源敲擊實驗(active seismic experiment)及被動式表面波分析法(passive seismic surface wave method)，以得到現場之格林函數計算參數，(3)試驗前後河床高程地形模型建置及底床泥砂粒徑調查，(4)利用 USFS 現地試驗方式，來了解實驗時推移載的時序量體變化，(5)設計人工注水及可控制泥砂料源置入裝置，並針對置入泥砂料源進行粒徑控制，(6)在泥砂料源中選取不同粒徑泥砂安裝追蹤粒子，來了解在試驗時不同粒徑泥砂之運移

路徑，(7)利用微地動觀測網與分散式光纖感測器(distributed acoustic sensor, DAS)來記錄試驗當時之環境微地動訊號，(8)安裝水壓計及攝影機以了解試驗當下的水文歷時變化。

計畫目標

本計畫主要配合水土保持局創新研究計畫要求之「基礎試驗研究」領域，目前震波躍移模型尚未經過可控制之野外現地的實驗場址進行驗證及可行性評估。前期計畫已完成數組的室內渠槽泥砂顆粒運移試驗，透過多元感測器(智能球加速度計顆粒、水聲計及地聲計)配合攝影測量已完成建立「顆粒躍移運動及動力參數分析程序」、「顆粒放落敲擊試驗計算渠槽 Green' s function 分析程序」、「機率式非垂直撞擊之震波躍移物理初步模型」。但是，前一期計畫執行僅考慮固定坡度及單一均勻底床粒徑進行試驗，預計今年度將改變渠槽坡度、底床粒徑鋪面、多種密度之智能球及水流條件持續進行多起室內渠槽試驗，經由彙整室內試驗成果來規劃大型試驗渠道場址(蘭島溪)來持續驗證推移載通量預估之震波物理模型的適用性，預計進行的試驗規劃及相關調查與量測儀器配置條列如下：(1)透過持續進行渠槽試驗之經驗，規劃大型野外試驗場之泥砂粒徑、流量、河寬尺寸、坡度、(2)進行河道整理,控制河道寬度、河床坡度及底床泥砂粒徑分布、(3)試驗前後河床高程地形模型建置及底床泥砂粒徑調查、(4)利用 USFS 現地試驗方式，來了解實驗時推移載的時序量體變化、(5)設計人工注水及可控制泥砂料源置入裝置，並針對置入泥砂料源進行粒徑控制、(6)設計不同尺寸及比重之智能顆粒及混合天然泥砂顆粒來進行試驗、(7)利用地表微地動陣列及底床中光纖地震儀來紀錄試驗期間的微地動訊號、(8)利用自行開發之水聲計紀錄環境水聲訊號來釐清可以的水環境震動來源、(9)安裝水壓計及攝影機以了解試驗當下的水文歷時變化。期能最終得以有效提升震波式推移載分析技術在河川推移載量測上的應用價值。

第二章 工作執行與方法步驟

第一節 方法介紹

1. 震波式推移質跳躍模型：

微地動位移時序資料(u)可以表示為特定粒徑(D)泥砂顆粒跳躍式撞擊河床作用力(F)、格林函數(波傳路徑效應; G)及測站場址效應(S)的卷積作用(*; convolution)，如公式(1):

$$u(t, x_s, D, x_f) = \bar{F}(t, x_f, D) * G(t, x_s; x_f) * S(t, x_s) \quad (1)$$

其中 x_s 為測站位置向量， x_f 為撞擊作用力位置向量。透過傅立葉轉換可以時間域轉換成頻率域，卷積運算在頻率域為相乘的運算作用，且在時頻域微分位移時序資料轉換成速度時序資料的動作，相當於在頻率域乘上 $i2\pi f$ ，其中 f 為頻率，則公式(1)可以改寫為微地動速度振幅譜函數：

$$|i\omega(f, x_s, D, x_f)| = 2\pi f \bar{F}(f, D, x_f) G(f, x_s; x_f) S(f, x_s) \quad (2)$$

若假設泥砂顆粒撞擊作用力為瞬時且垂直於河床作用(Tsai et al., 2012)，撞擊作用之接觸時間(t_c)為 1 毫秒(此假設與可以使用的最大頻率有關，約為 1,000 Hz)，則單一粒徑 D 顆粒作用力之振幅頻譜為：

$$\begin{aligned} F(f, D, x_f) &= \int_0^{t_c} a(t) dt = m[w_i + w_r] \\ &= m[w_i + C_1 w_i] (1 + C_1) m w_i = \frac{\pi}{6} D^3 (1 + C_1) \rho_s w_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中 m 為泥砂顆粒質量(kg)、 D 為泥砂粒徑(m)、 ρ_s 為泥砂密度

(kg/m³)、 w_i 為瞬時垂直撞擊速度(m/s)。 $C_1=0$ 時為完全非彈性碰撞， $C_1=1$ 時為完全彈性碰撞，Tsai et al. (2012)假設為完全彈性碰撞條件，其中 C_1 可以定義為垂直反彈速度(w_r)與垂直撞擊速度(w_i)的比值($C_1=w_r/w_i$)。另外，實際上泥砂顆粒躍移撞擊河床時並非為垂直碰撞且於碰撞時並非為完全彈性碰撞，因此本計畫將預計於室內渠槽試驗中，配合智能泥砂顆粒(smart rock)，來進行量測真實泥砂顆粒碰撞的運動及力學參數。假設地層材料為水平分層介質(僅考慮垂直方向上為非均勻介質)，震波遠場近似的條件下，垂直作用力於垂直分量方向(vertical-to-vertical)上記錄之雷利波格林函數 $G(f, x_s, x_f)$ 可以表示如公式(4)(Aki and Richards, 2002):

$$G(f, x_s, x_f) \cong \frac{C_2(f)k}{8\rho_s v_c v_u} \sqrt{\frac{2}{\pi k |x_s - x_f|}} e^{-\pi f |x_s - x_f| (v_c C_3)} \quad (4)$$

k 為波數定義為 $2\pi/\lambda$ ， v_c 為雷利波相位速度(m/s)， v_u 為雷利波群速度(m/s)。 C_2 為雷利波特徵函數值， C_3 為震波品質因子(控制震波能量非彈性衰減程度)。以上格林函數的使用需滿足震波傳遞距離乘以波數($r \times k$)需大於 1，否則會有近場效應的影響(代表固定測站距離的條件下，分析所使用的訊號頻率不可以太低)。本計畫定義單一粒徑 D 且泥砂粒徑隨機瞬時垂直撞擊河床引致的微地動功譜密度值(power spectral density, P_i)為:

$$P_i(f, x_s, D; x_f) = \frac{|t(f, x_s, D; x_f)|^2}{T} = \frac{F^2(f, D, x_f)G^2(f, x_s; x_f)}{T} \quad (5)$$

T 為分析窗口訊號長度(sec)，亦可以代表特定粒徑 D 之泥砂顆粒躍移作用的時間(t_b)，其對應的單位躍移作用距離長度(saltation hop length, L_b ; unit: m)之特定粒徑 D 的泥砂顆粒數量(n)為公式(6):

$$n_D(D) = \frac{p_D(D)N}{L_b} \quad (6)$$

N 為在 L_b 作用長度之下的總泥砂顆粒數量， p_D 單位粒徑 D 之粒徑機率分佈函數(Tsai et al., 2012; 以 Log-rasied cosine function 描述)。彙整公式(3)及公式(6)，則公式(5)可以改寫為:

$$P_i(f, x_s, D; x_f) = \frac{n_D(D)}{t_b(D)} F^2(f, D, x_f) G^2(f, x_s; x_f) \quad (7)$$

n_D/t_b 比值即為泥砂顆粒粒徑 D 於躍移作用長度 L_s 中的撞擊速率 (impact rate, I_r)，此 I_r 已有國內外文獻提出不同的經驗表達式，因此本計畫主要研究工項即為測試與歸納不同經驗式的適用性評估。若假設單位河川長度(即為作用長度距離 L_b)且隨機作用(此為 Tsai et al., 2012 假設；本計畫將於室內渠槽試驗章節中說明考量機率式的泥砂躍移作用之物理模型)泥砂顆粒的撞擊速率(I_r)則特定粒徑 D 泥砂作用於總河川長度為 R ，且最短的測站與撞擊作用距離 $|x_s-x_f|$ 等於 r_0 ，則沿著河道上特定粒徑 D 泥砂顆粒躍移撞擊作用的加總微地動功譜密度值(P)為:

$$\begin{aligned} P_i(f, D, x_s) &= \int_R P_i(f, D, x_s; x_f) dx_f \\ &= \frac{n_D(D)}{t_b(D)} \int_R F^2(f, D, x_f) G^2(f, x_s; x_f) dx_f \end{aligned} \quad (8)$$

彙整公式(3)及公式(4)帶入公式(8)，並假想河道作用段為無限且筆直(R 遠大於 r_0)，可計算積分而得公式(9):

$$P_i(f, D, r_0) \cong \frac{n_D(D)}{t_b(D)} \frac{\pi^2 f^3 m^2 w_i^2}{\rho_s^2 v_c^3 v_u^2} \chi(\beta) (1 + C_1)^{-1} C_2^2(f) \quad (9)$$

公式(9)中的顆粒運動學參數 w_i ，本計畫亦預計測試不同經驗式提出其適用式評估報告。其中微地動訊號波傳路徑衰減相關參數 χ 及 β 為積分而得的衰減函數及衰減係數項，如公式(10)及(11)定義(Tsai et al., 2012):

$$\chi(\beta) \cong 2 \ln(1 + \frac{1}{\beta}) e^{-2\beta} + (1 - e^{-\beta}) e^{-\beta} \sqrt{\frac{2\pi}{\beta}} \quad (10)$$

$$\beta = 2\pi r_0 (1 + C_4) f^{1+C_4-C_5} / (v_{c0} C_3 f_0^{C_4-C_5}) \quad (11)$$

f_0 為參考頻率 1Hz， v_{c0} 為頻率 1Hz 對應的雷利波相位速度。係數 C_4 及 C_5 與地層介質的速度構造及衰減性質有關，將於章節「主動式震源敲擊試驗與被動式表面波分析法」一併詳述說明。公式(10)中的撞擊速率 I_r (n_D/t_b) 亦可以導入特定粒徑 D 之推移載通量(bedload flux, q_{bD})與顆粒平均躍移速率 U_b ，將可以進一步定義如下(Lajeunesse et al., 2010):

$$I_r = \frac{W q_{bD}}{V_p U_b t_b} = \frac{W q_{bD}}{V_p L_b} \quad (12)$$

其中 W 為河道寬度(m)， V_p 為泥砂顆粒體積(m^3)， q_{bD} 單位粒徑 D 及單位河寬之推移質流量(m/s)，Tsai et al. (2012)定義的撞擊速率 I_r 如公式(13)所示：

$$I_r = \frac{W q_{bD}}{V_p} \frac{2}{3} \frac{\bar{w}_z}{U_b H_b} \quad (13)$$

其額外需導入躍移層泥砂厚度(saltation layer heigh, H_b ; unit: m)及平均顆粒躍移垂直沈降速率。針對公式(12)中 L_b 參數本計畫預計測試不同的經驗式，如公式(14)(Auel et al., 2017)與公式(15)(Gimbert et al., 2019):

$$L_b(D) = 2.3D \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right)^{0.8} \quad (14)$$

$$L_b(D) = 1.19 \sqrt{RgD} \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right)^{0.3} 0.14 \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right)^{0.28} \quad (15)$$

g 為重力加速度 9.81m/s^2 ， R 為相對密度比值 $(\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ ， ρ_f 為水密度 ($1,000\text{ kg/m}^3$)。上述公式(14)及(15)皆須在滿足推移質運移啟動門檻為。底床剪應力(τ^*)需大於臨界底床剪應力(τ_c^*)，其分別定義如公式(16)及(17)(Parker, 1990; Lamb et al., 2008):

$$\tau^* = \frac{u^*}{RgD} \quad (16)$$

$$\tau_c^* = \tau_{cd50}^* \left(\frac{D}{D_{50}} \right)^{-0.9} \quad (17)$$

其中 u^* 為底床剪力速度(m/s)及中位粒徑對應的臨界底床剪應力分別定義如下:

$$u^* = \sqrt{gH \sin \theta} \quad (18)$$

$$\tau_{cd50}^* = \exp[a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4] \quad (19)$$

$x = 0.407 \cdot \ln(142 \cdot \tan \theta)$ for $10^{-4} < \tan \theta < 0.5$

H 為水深(m)， θ 為底床坡角(degree)。公式(19)中的係數分別為 $a_0 = -3.14$ 、 $a_1 = 0.41$ 、 $a_2 = 0.142$ 、 $a_3 = 0.0894$ 及 $a_4 = 0.0259$ (Lamb et al., 2008)。

本計畫亦預計測試相對複雜的 I_r 表達式(公式(13)，Lamb et al., 2008; Tsai et al., 2012)，其中躍移泥砂顆粒參數之 U_b 及 H_b 分別定義如下：

$$U_b = 1.56 \sqrt{RgD} \left[\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right]^{0.56} \quad \text{for } U_b \leq U \quad (20)$$

$$H_b = 1.44D \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right)^{0.5} \quad \text{for } H_b \leq H \quad (21)$$

其中 U 為深度平均流速(m/s)定義如下(Parker, 1991):

$$U = 8.1u^* \left(\frac{H}{k_s} \right)^{1/6} \quad (22)$$

其中 k_s 為底床粗糙程度，本計畫假設為 3 倍的中位粒徑($3D_{50}$; Kamphius, 1974)，其代表底床糙度越大流速越慢。公式(13)中的推移質層中的顆粒平均沉降速度定義如下(Sklar and Dietrich, 2004):

$$\bar{w}_s = \frac{\hat{H}_b w_{st} \cos \theta}{2 \ln \left[e^{\hat{H}_b/2} + \sqrt{e^{\hat{H}_b} - 1} \right]} \quad (23)$$

終端沉降速度(w_{st} , m/s)可定義於公式(23)(Lamb et al., 2008):

$$w_{st} = \sqrt{4RgD/3C_d} \quad (24)$$

上式 C_d 為阻力係數，本計畫將參考 Dietrich (1982) 的計算方式。無因次推移質層高度表示如下：

$$\hat{H}_b = \frac{3C_d \rho_f H_b}{2\rho_s D \cos \theta} \quad (25)$$

在公式(12)之中皆有單位粒徑 D 及單位河寬之推移質流量(q_{bD})，根據公式(6)及公式(12)得知 q_{bD} 可以表達如下：

$$q_{bD} = \frac{Np_D(D) V_p U_b}{WL_b} \quad (26)$$

則可針對所有粒徑顆粒貢獻的 q_{bD} 進行積分，即可以求得總單寬推移

質通量(total bedload flux, q_b):

$$q_b = \int_D q_{bD} dD \quad (27)$$

利用單位粒徑顆粒下之粒徑機率分佈曲線(p_D)與 q_b 即可定義 q_{bD} :

$$q_{bD} = q_b p_D \quad (28)$$

由於前人研究指出震波物理模型相對易受到大粒徑泥砂顆粒影響，然而傳統的粒徑機率分佈曲線(例如: log-normal distribution)對於大粒徑部分易有高估現象，因此本計畫將採用 log-raised-cosine 分佈 (Tsai et al., 2012)，並測試不同的機率分佈去尾門檻值。本計畫亦控制 q_b 值不可以超過最大可發生的推移質通量 q_{bc} (Fernandez Luque and van Beek, 1976):

$$q_{bc} = 5.7 \sqrt{RgD_{50}^3} (\tau^* - \tau_c^*)^{1.5} \quad (29)$$

回到公式(9)尚有瞬時垂直撞擊速度 w_i 參數未知，本計畫將採用三種不同的經驗式來進行計算並測試何者為優，其中包含 Tsai et al. (2012)、Auel et al. (2017)、Gimbert et al. (2019)分別列舉於公式(30)~(32):

$$w_i = \sqrt{\frac{4RgD}{3Cd}} \cos \theta \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{3C_d \rho_f \cdot 1.44D \left(\frac{gH \sin \theta}{RgD\tau_c^*} \right)^{0.5}}{2\rho_s D \cos \theta} \right] \right\}^{0.5} \quad (30)$$

$$w_i = 0.84 \sqrt{RgD} \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right)^{0.18} \quad (31)$$

$$w_i = 0.51 \sqrt{RgD} \left(\frac{\tau^*}{\tau_c^*} - 1 \right)^{0.25} \quad (32)$$

在此將所有泥砂粒徑 D 的功譜密度(公式(8))進行積分即可得總

和功譜密度:

$$P_b(f, r_0) = \int P(f, r_0, D) dD \quad (33)$$

進一步計算單位推移質通量 q_b 之功譜密度值為:

$$\hat{P}_b(f, r_0) = P_b(f, r_0) / q_b \quad (34)$$

若假設觀測微地動功譜密度值(P_{all}^{obs})皆來自於推移質作用源(P_b^{obs})，

則透過震波式推移質跳躍模型可直接預估推移質通量:

$$q_b^{model} = \frac{P_b^{obs}}{\hat{P}_b} \quad (35)$$

2.主動式震源敲擊試驗與被動式表面波分析法：

若要應用震波式推移質跳躍模型，須仰賴精確的雷利波格林函數計算。根據公式(5)中的係數 C_2 、 C_3 、 v_c 及 v_u 與公式(10)中的係數 C_4 及 C_5 都與試驗現場的地層介質剪力波速度構造有一定的關聯性，由此可知，現場的剪力波速度構造為重要的關鍵參數。因此，本計畫預計使用微地動線型陣列配合多頻道表面波分析法(multi-channel analysis of surface wave, MASW; Olafsdottir et al. (2017))，利用等間距的線型陣列接收人工主動敲擊震源的地動訊號，透過傅立葉轉換進入到頻率域進行表面波頻散曲線的量測，利用量測的相位速度隨著頻率的變化曲線進行一維層狀剪力波速度模型的非線性反演計算(圖 6)。進一步，在利用反演的剪力波速度構造成果，進行理論的雷利波相位速度計算(v_c^{model})與雷利波特徵函數 C_2 (Herrmann, 2013)，參考公式(34)及(35)，進行線性回歸分析可獲得斜率(C_4)及截距($\log_{10}(v_{c0})$ ，頻率 1Hz 的相位速度)。

$$v_c^{\text{model}} = v_{c0} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-C_4} \quad (36)$$

$$\log_{10}(v_c^{\text{model}}) = \log_{10}(v_{c0}) - C_4 \log_{10}(f / f_0) \quad (37)$$

透過已知的 C_4 係數(雷利波相位速度頻散特性)則可以直接推估雷利波群速度，如公式(36)所示：

$$v_u^{\text{model}} = v_c^{\text{model}} / (1 + C_4) \quad (38)$$

根據公式(3)~(6)，針對單一人工敲擊試驗位置至微地動測站位置距離為 $r_i(m)$ ，測站記錄的功譜值(power spectral, ps)可表示為公式(39):

$$|\dot{u}(f, r_i)|^2 = \left[\frac{C_2 k \pi f F S}{8 \rho_s v_c v_u} \right]^2 \cdot \left(\frac{2}{\pi k} \right) \cdot \left(\frac{1}{r_i} \right) \exp(-2 \pi f r_i / (v_u C_3)) \quad (39)$$

$$ps = |\dot{u}(f, r_i)|^2; A(f) = \left(\frac{C_2 k \pi f F S}{8 \rho_s v_c v_u} \right)^2 \frac{2}{\pi k} \quad (40)$$

根據公式(39)~(40)並利用最小的功譜值乘上 r_i 數值進行正規化，如公式(39):

$$\frac{sp \cdot r_i}{(sp \cdot r_i)_{\min}} = \frac{A(f)}{(sp \cdot r_i)_{\min}} e^{-2 \pi f r_i / (v_u C_3)} \quad (41)$$

公式(41)兩側取用自然對數即可以將方程式進行線性化，如公式(42):

$$\ln \left(\frac{sp \cdot r_i}{(sp \cdot r_i)_{\min}} \right) = \ln \left(\frac{A(f)}{(sp \cdot r_i)_{\min}} \right) - \left(\frac{2 \pi f r_i}{v_u} \right) C_3^{-1} \quad (42)$$

透過線性回歸分析將可以透過斜率計算求得 C_3 係數(震波品質因子)，選取不同的頻率 f ，重複公式(39)~(42)即可求得不同頻率所對應的 C_3 係數。震波品質因子隨著頻率的變化可以表達成公式(43):

$$C_3 = C_3^0 (f / f_0)^{C_5} \quad (43)$$

其中 C_3^0 為頻率為 1Hz 時的震波品質因子，進一步將公式(43)等號兩邊取以 10 為底數的對數進行線性化，如公式(44)所示:

$$\log_{10} C_3 = \log_{10} C_3^0 + C_5 \log_{10} (f / f_0) \quad (44)$$

回歸分析後得截距可以用來計算 C_3^0 且斜率代表的 C_5 係數(品質因子 C_3 隨著頻率變化特性)。Tsai et al. (2012)則是直接假設 C_3^0 為 20 且 C_5 係數為 0，代表震波品質因子並不隨著頻率而改變。

關於被動式表面波分析法傳統利用周遭噪訊水平-垂直單站頻譜比法(H/V ratio)進行淺層地下剪力波層狀速度模型反演，往往會因為混合使用洛夫波(Love-wave)與雷利波(Rayleigh-wave)導致在速度模型估算成果上具有一定程度的誤差存在。Berbellini et al. (2018)提出利用時頻訊號極化分析技術(polarization analysis)可從特定的時窗口的時序地動訊號之極化程度(degree of polarization, DOP)來分離出周遭噪訊屬於雷利波的訊號。一般 DOP 為介於 0~1 的數值區間，當 DOP 等於 1 時代表地動訊號的質點運動形式為於垂直平面上呈現完美的橢圓形狀；另外，極化分析亦可提供反方位角(back azimuth, BAZ)，其角度代表指向雷利波訊號的來源。圖 7 顯示雷利波在垂直平面上的倒退式的橢圓質點運動軌跡與橢圓平面的向量分布(elliptical vector, e)，向量 e 為半長軸向量 a (semi-major vector)與半短軸向量 b (semi-minor vector)的向量外積結果。特定的時間(t)及頻率(f)的 DOP 可表示如公式(45):

$$DOP(t, f) = \left(\frac{1}{N(f)} \sum_{\tau=t-\frac{T(f)}{2}}^{t+\frac{T(f)}{2}} \left| \frac{m(t, f)}{|m(t, f)|} \cdot \frac{e(\tau, f)}{|e(\tau, f)|} \right|^{P_1} \right)^{P_2} \quad (45)$$

其中 $m(t, f)$ 為特定的時間中心及頻率於時窗長度 $T(f)$ 之平均向量，其定義如公式(46):

$$m(t, f) = \frac{1}{N(f)} \sum_{\tau=t-\frac{T(f)}{2}}^{t+\frac{T(f)}{2}} \frac{e(\tau, f)}{|e(\tau, f)|}; \quad T(f) = 4 / f \quad (46)$$

公式(43)中的指數係數 $P1$ 及 $P2$ 越大代表 DOP 分析成果越不容易滿足使用者設定之 DOP 門檻值，相關雷利波橢圓率之剪力波成像分析流程彙整於圖 8，其中剪力波層狀速度構造的反演程序是利用 Sambridge (1999)提出的最大近鄰法。

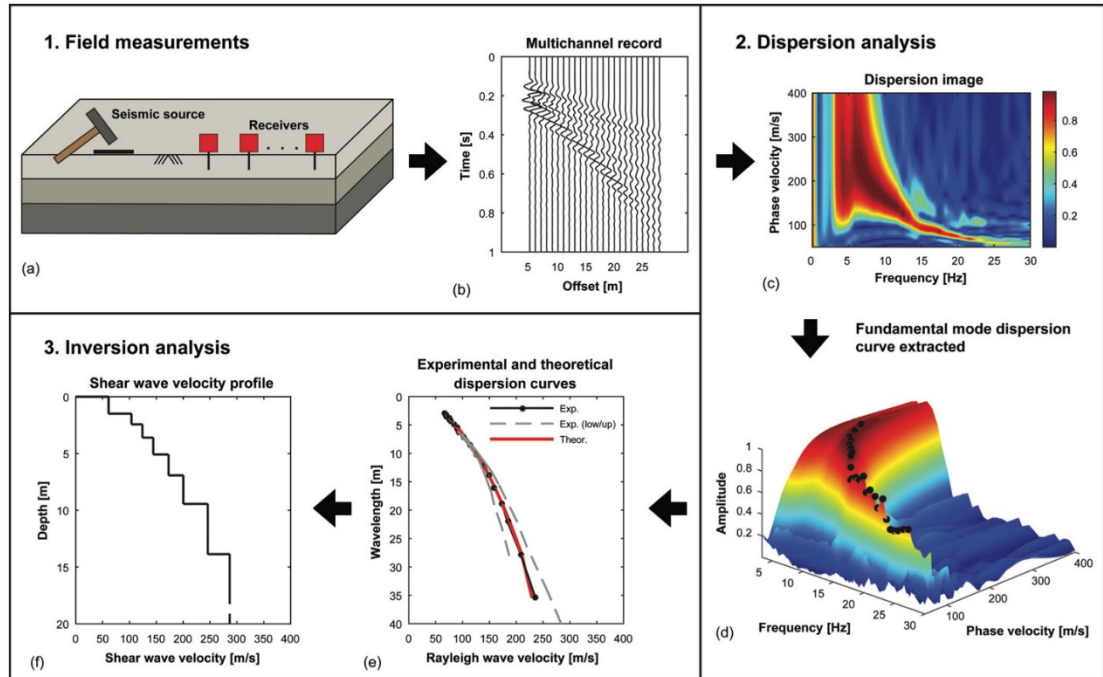


圖 6 MASW 及一維速度反演分析方法流程

(Olafsdottir et al., 2018)

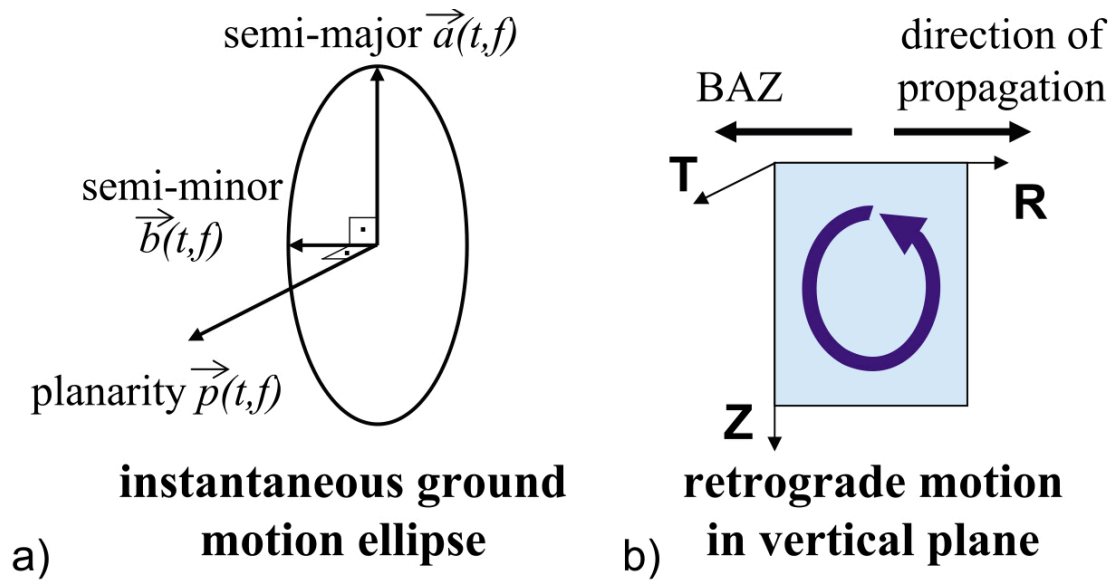


圖 7 雷利波倒退式橢圓軌跡與向量

(Schimmel et al., 2011)

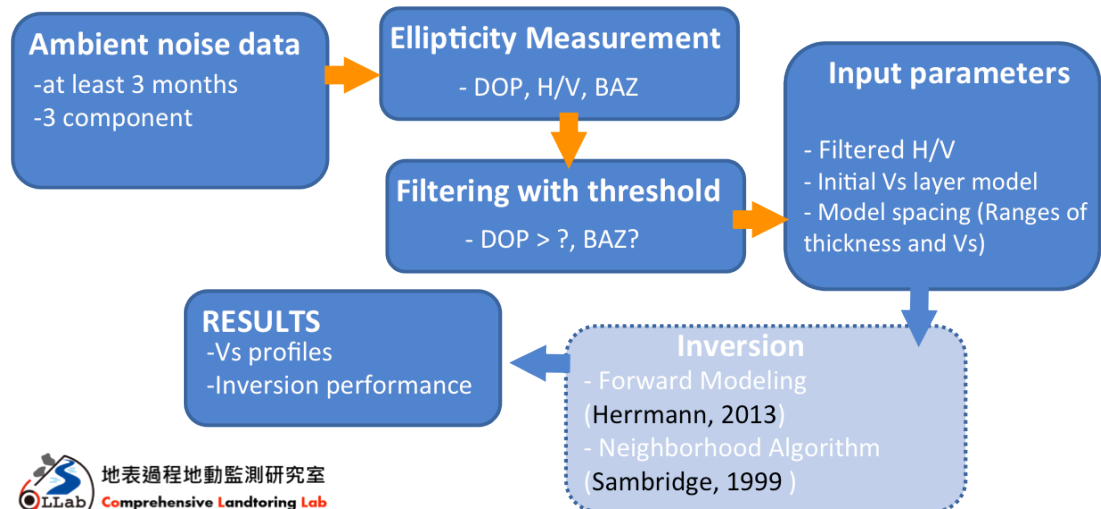
DOP Analysis and Vs Inversion

圖 8 被動式表面波分析法流程

3.河床粒徑調查：

本計畫除了規劃傳統式的網格法或體積法進行河床表面粒徑調查，同時亦使用影像法來提升粒徑調查在空間上的覆蓋率，主要分析方法參照楊曜臣(2021)。利用樹莓派(Raspberry Pi)安裝相機模組，利用手機與 ssh 通訊軟體連接樹莓派進行拍攝像片操作，照片畫面中涵蓋標準粒徑樣板以利於進行運算前處理，計算照片的拍攝高度及相片解析度(mm/pixel)。在影像處理上的分析流程包含：非局部平均影像降噪(non-local means denosing)、大津二值化遮罩分析(ostu thresholding)、邊界偵測(black top-hat、canny 及 sobel edge detection)、擬合橢圓求得粒徑長軸及短軸長度與繪製粒徑分析曲線成果，如圖 9 所示。另針對試驗前後，USFS 量測範圍，以及下游河道，則於試驗前後另進行河床質採樣分析，其目的在於了解試驗前後前河床堆積層粒徑分布，採樣工作利用「樣坑式河床質採樣」方式，包括粗顆粒篩分析以及細粒料室內篩分析。

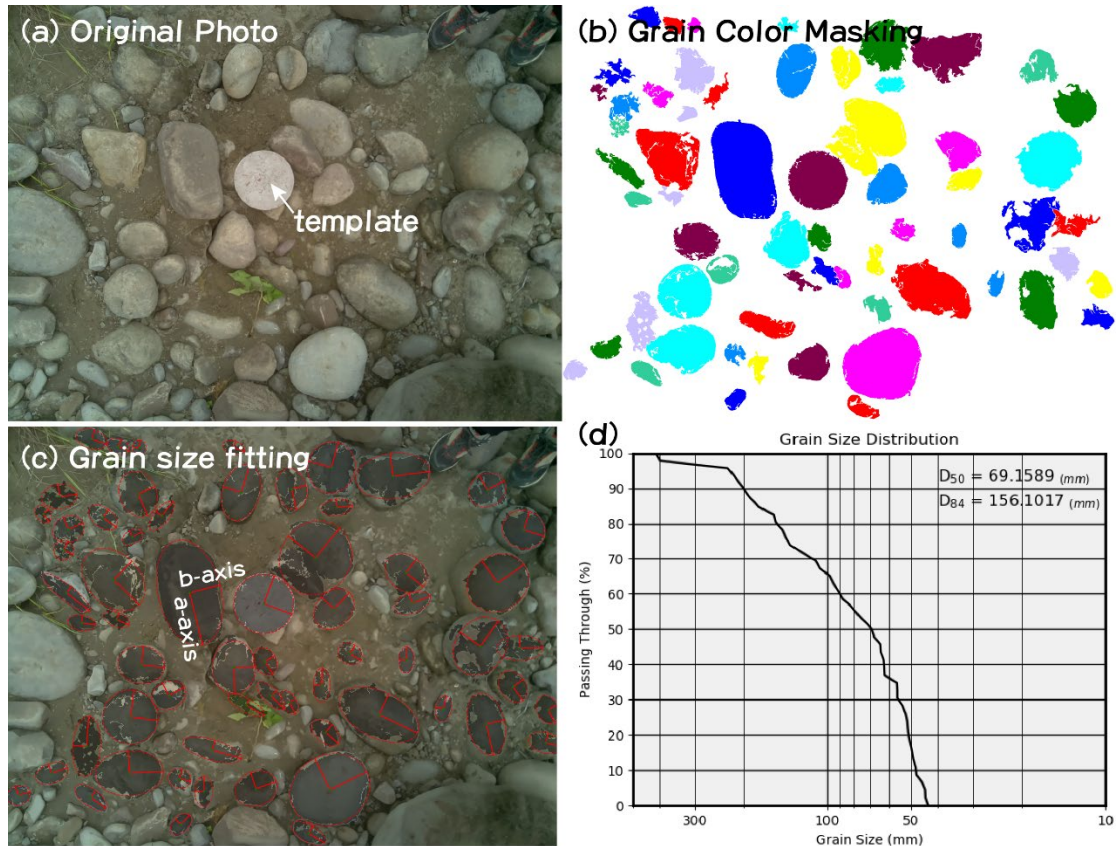


圖 9 影像法粒徑分析流程

4. 正射影像製作：

本計畫進行 UAV 空拍前，先於預計拍攝範圍製作旗幟形地面控制點(ground control point, GCP)，至少涵蓋五個 GCP(拍攝範圍左上、左下、右上、右下及中心)，並於其中配置 2~3 個檢核點，以校核製圖準確性，並以 RTK 進行控制點三維座標量測。飛行前進行航線規劃，設定期望相片解析度為 3cm/pixel，拍攝行高為 56m，縱向及橫向重疊度分別為 80%及 60%。最終以 Pix4D 軟體 UAV 所拍攝照片進行分析，可輸出檔案包含三維點雲、數值高程模型及正射影像成果。本計畫欲透過試驗前後的正射影像比對成果，掌握河床高程的變化量來作

為反向的驗證比對依據，以強化輸砂量分析成果。

5. 泥砂觀測：

為取得試驗過程中推移載運移資料，本計畫將於渠道中設置人工採樣器採樣量測，採樣器擬使用美國農業部山地科技中心 USFS 型採樣器，於渠道中設置溪床固定架、並由支架與囚砂網連結至溪床固定架，囚砂網預計設置 30x20cm，攔阻河床土砂粒徑，其設置預計於試驗過程中，由人工更換囚砂網 1-3 次。囚砂網中粒徑，則於試驗後進行粒徑與重量分析，掌握推移載之時序過程。

針對推移質的運動軌跡，本研究預計透過自製的小型感測器置入於礫石中，透過六軸感測器(MPU-6050)的位置進行顆粒的追蹤。在過去的研究中，本研究團隊以六軸感測器搭配 Micro-SD 記憶卡存取模組成功的紀錄大尺度潰壩實驗時底床的變動狀況（圖 10，Hung et al., (2022)），該感測器受限於電池的尺寸導致感測器較常規推移質較大，但因本研究中較無電池的限制，因此預計可透過縮小電池尺寸達到量測軌跡之目的。本實驗預計運用自製式碰撞感測器內部是由 Arduino Nano、MPU-6050 及 Micro SD 卡模組，外殼為直徑 7 公分的塑膠球殼，以達到防水及保護內部模組之功能。由於感測器體積較大，故藉由調整比重，來模擬出土砂顆粒在水下運移的過程並且透過紀錄撞擊渠底的次數及力量大小與震測訊號進行比對。以下將針對感測儀器的

分布零件進行說明：(1) Arudino Nano 作為一資料處理之平台，為一個開源嵌入式硬體平台，處理器為 AVR ATmega328P 微控制器，這是一個高效且功能強大的 8 位元微控制器，可運行在 16MHz 的時脈速度下，擁有 32KB 的閃存記憶體和 2KB 的 SRAM，提供足夠強大的運算功能，同時擁有一系列的數位和類比輸入與輸出的腳位，以連接和控制各種外部設備和傳感器，具有 14 個數位輸出/輸入腳位（其中 6 個可以用作 PWM 輸出），以及 8 個類比輸入腳位，在這樣完整的功能下，其尺寸僅為 18mm*45mm，可滿足本實驗縮小顆粒體積的需求。並且在 Arudino 的開發環境的支援下，具有相當完整的資料庫支援，供開發人員使用。(2) MPU-6050 為一常見的運動感測元件，具有三軸加速度計和三軸陀螺儀，其加速度計可用於測量物體在三個方向上的加速度，可以提供高達 16 位的數字加速度值，可以測量靜態和動態加速度，其加速度計感測範圍達 $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$ 、 $\pm 8g$ 與 $\pm 16g$ 最小加速度變化解析率為 2048 LSB($^{\circ}/s$)，而三軸陀螺儀可用於測量物體的角速度或轉動速率，可以提供高達 16 位的數字角速度值，陀螺儀數值感測範圍為 $\pm 250^{\circ}$ 、 $\pm 500^{\circ}$ 、 $\pm 1000^{\circ}$ 、 $\pm 2000^{\circ}/s$ ，最小角度變化解析率為 16.4 LSB($^{\circ}/s$)。可經由程式碼控制不同感測範圍及最小解析力，對於快/慢速運動之物體進行精準追蹤。其數值輸出頻率可達 200Hz，以提供低延遲且準確的成果。透過完整紀錄其顆粒的運動軌跡，搭配

已知的重量，及可計算出顆粒對於底床的撞擊力量及頻率。(3) Micro SD 卡模組，為了能將碰撞的資料有效的保存，並且考量到無線傳輸的難度與其不穩定性，本團隊採用內建的記憶卡將資料完整的紀錄保存，並且在最後下游的蓄水池中統一收集，在實驗之後將資料彙整後與其餘量測設備進行完整的比較。

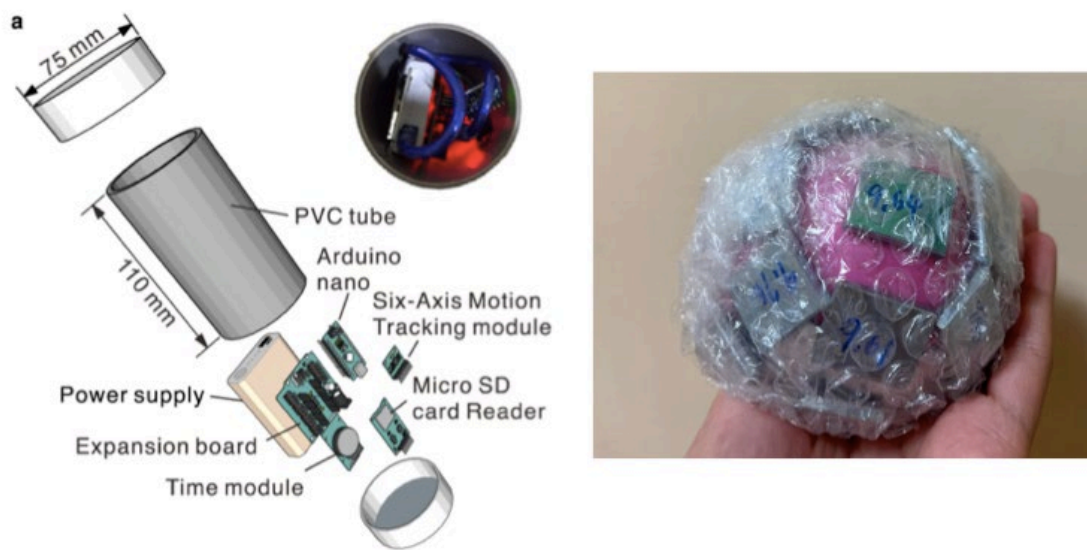


圖 10 自製顆粒碰撞感測器
(Hung et al. 2022)

第二節 試驗監測儀器介紹

本計畫主要使用的感震器類型為三軸向低頻地聲計(HG-6 A-Coil)，其自然震盪頻率為 4.5 Hz，感震器的敏感度為 28 Volt/m/s，硬體規格為直徑 25.4 mm、高 36.0 mm、重量約 85 g，儀器可操作溫度範圍為-40 ~ 100°C。可搭配 Data-CUBE 紀錄器使用，設定資料取樣率為每秒 400 點且放大倍率(Gain)為 16，可計算求得敏感度常數(sensitivity constant)為 $5.4495675 \times 10^{-10}$ m/s/count，整體設備運作耗功率約 0.2 Watt。依據目前的儀器參數設定，可記錄的頻率範圍為的頻率範圍為 0.22~100 Hz。另外，配合實驗同時亦測試其他震動感測器，例如 SmartSolos (IGU16, 5G) all-in-one 三軸向 Geophone，其整體設備運作耗功率約 0.14Watt，內含 128 GB 資料儲存空間，單獨使用內部電池可以連續運作 15 天；另外本試驗亦預計於渠床地下及渠道外側埋設分散式光纖感測器 DAS，使用設備為 Silixa iDAS-v2，其配置為 10 公尺 gauge length，儀器取樣頻率為 1k Hz，輸出頻道間距為 1 公尺，預估整體 DAS 測線總長約為 150 公尺。

針對水流的狀況，可透過水壓計(HOBO Water Level Logger U20-001-0)進行水位的量測並且透過下游端與上游端取樣的結果，進而可得到出流量的資料。同時，為了能完整紀錄實驗過程，可透過放置固定投遞保麗龍球於水面上搭配多台攝影機進行拍攝，可建置水面流速

的分布狀況 (Tsornng et al., 2006)。本實驗沿著實驗渠道架設多台攝影機進行紀錄，透過事前的攝影機空間率定，建立攝影機與空間的關係，再透過閃光燈的定期閃動，將多台攝影機進行時間上的同步，即可使用既有的粒子影像追蹤計算方法估算表面流速。為使用影像分析方法進行三維空間轉換，計算上需要至少兩種不同視角之影像提供座標資訊。攝影機配置條件視角需明顯不同，讓目標物保持在影像中間區域，以減少鏡頭造成影像變形之誤差。為增加顆粒追蹤準確性、保持計算效能、提升追蹤觀測範圍，可採用任意三台攝影機之影像來求解單一顆粒於特定時間點之位置。如圖 11，若採用相機 1,2,3 來計算顆粒的三維空間座標，可得以下關係式：

$$\begin{aligned}\vec{X}_a &= \vec{p}_1 + \lambda_1 \vec{q}_1 \\ &= \vec{p}_2 + \lambda_2 \vec{q}_2 \\ &= \vec{p}_3 + \lambda_3 \vec{q}_3\end{aligned}\quad (47)$$

其中 $\vec{X}_a = (x_a, y_a, z_a)$ 為顆粒之三維空間座標， $\vec{p}_i = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$ 為相機 i 之空間位置向量， λ_i 為自由參數， $\vec{q}_i = (x_{qi}, y_{qi}, z_{qi}) = \vec{d}_i + \gamma_i \vec{r}_i + \rho_i \vec{c}_i$ 為相機 i 至顆粒在影像 i 上位置之空間向量， $\vec{d}_i$ 為影像 i 原點(左上角)的位置向量， $\vec{r}_i$ 為影像 i 的橫軸向量， $\vec{c}_i$ 為影像 i 的縱軸向量， (γ_i, ρ_i) 為顆粒在影像 i 上的座標。根據率定可知 $\vec{X}_a, \vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3, \vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{q}_3$ ，公式(47)僅剩三個未知參數 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ，可用最小平方法求解以下矩陣式(公式(48))得其最佳解，從而推算出顆粒座標 $\vec{X}_a = (x_a, y_a, z_a)$ 。以流量、水位及表面流速的資料即可完整的建置出水流狀況與推移質運移的關係，並透過模式的

發展進行驗證(圖 11)。

$$\begin{bmatrix} q_1^T q_1 & -q_1^T q_2 & 0 \\ q_2^T q_1 & -q_2^T q_2 & 0 \\ -q_1^T q_1 & 0 & q_1^T q_3 \\ -q_3^T q_1 & 0 & q_3^T q_3 \\ 0 & q_2^T q_2 & -q_2^T q_3 \\ 0 & q_2^T q_3 & -q_3^T q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^T (p_2 - p_1) \\ q_2^T (p_2 - p_1) \\ q_1^T (p_1 - p_3) \\ q_3^T (p_1 - p_3) \\ q_2^T (p_3 - p_2) \\ q_3^T (p_3 - p_2) \end{bmatrix} \quad (48)$$

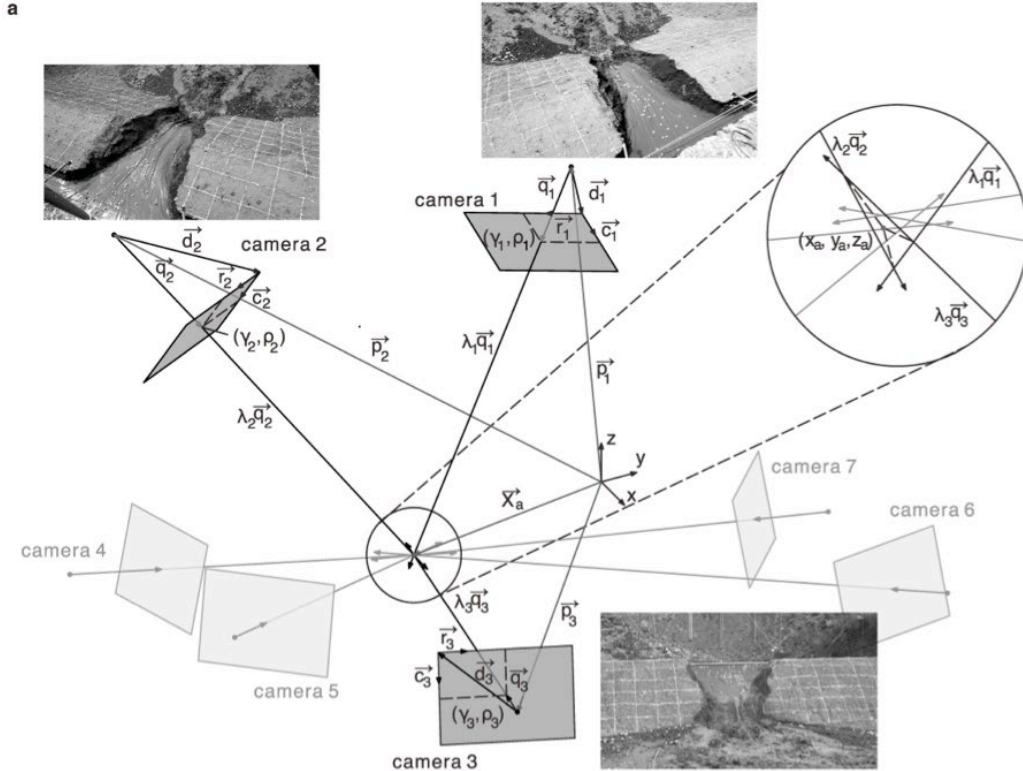


圖 11 透過多台攝影機建置表面流速示意圖
(Hung et al. 2022)

針對實驗過程中的水流及泥砂顆粒的碰撞聲音(hydroacoustic)，本研究使用 Raspberry Pi 設計為資料截取器，水聲計(Hydrophone)硬體使用 Aquarian Audio H2a-XLR-0 配合 20 公尺的 cable 線，利用 Zoom U22 放大器(amplifier)，將類比資訊數位化，相關儀器製作如圖 12 所示。

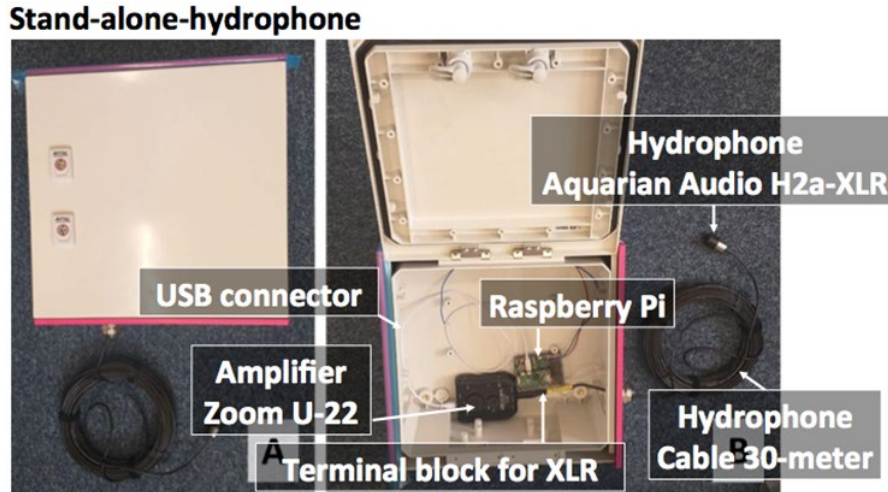


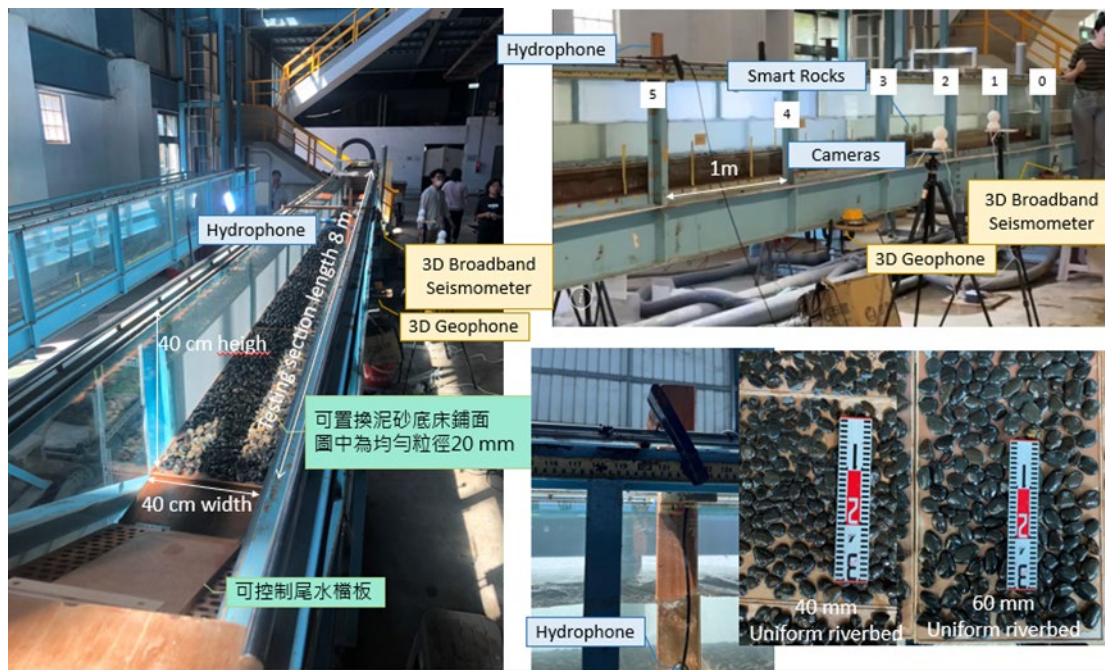
圖 12 本計畫自製水聲計

第三節 試驗規劃彙整與震波模型初探

本計畫預計驗證震波式推移質物理模型的可行性，主要測試彈性碰撞條件、格林函數計算參數、推移質動力經驗式、泥砂粒徑分佈可能造成的推移載數值的不確定性分析。彙整震波物理模式中係數 C_1 (彈性碰撞條件)、 C_2 、 C_3 、 C_4 及 C_5 (主要與現地地層介質的速度構造和頻率相依性之震波衰減特性有關)、推移質相關動力經驗參數(I_r 、 L_s 、 w_i 詳見公式(12)~(15)、公式(20)~(25)及公式(30)~(32))、粒徑分佈(詳見公式(27)~(28)) 對於模型計算成果的敏感程度。然而，若要完善的執行上述分析項目，需要有可靠的觀測推移載資料作為參考依據，且需要降低震波物理模型參數(係數 $C_2 \sim C_5$)、泥砂粒徑(底床與躍移顆粒)及躍移顆粒相關運動及力學經驗參數(C_1 、 U_b 、 t_b 、 L_b 、 w_i 、Shields stress)可能造成模型應用上的不確定性，再者，可以進一步考量非垂

直顆粒撞擊的作用，以機率式躍移物理模型來進行考量。基於上述之目的，本計畫執行第一年度已進行室內渠槽試驗，本實驗使用的人工渠道為鋼構渠道(圖 13)，全長 10 公尺、渠寬 40 公分、高 50 公分，渠槽兩側的為厚度 1 公分之透明壓克力板，底部為光滑不鏽鋼材料，本實驗在底部鋪以厚度 10 公分之木板並設計可抽換底床泥砂粒徑鋪面(近似均勻粒徑: 2、4 及 6 公分)，並製作下游透水尾水板，用以產出渠槽內部水深可達 20 公分，其水深控制主要的考量依據為實驗智能泥砂顆粒粒徑為 6.5 公分，因此理論上水深至少要達 3 倍的智能球直徑，方能滿足觀察顆粒躍移作用的假設。此渠槽可透過可調式閘門控制渠道內流量，水體經過渠道後再回到蓄水槽形成一個穩定流量循環系統。112 年度計畫執行室內實驗將渠槽坡度固定於 1.16%，並製作三種不同密度的智能泥砂顆粒(圖 14; 分別為白球 1.252 g/cm^3 、黑球 1.113 g/cm^3 、紅球 0.974 g/cm^3 ; 目前受限於智能顆粒的體積限制，尚無法提高顆粒密度)，每次實驗僅投放一顆智能泥砂顆粒(渠槽斷面位置 0)，已完成 6 組實驗，實驗中在渠槽斷面位置 1 的底床流速落在 $0.43\sim 0.69 \text{ m/s}$ 、表面流速為 $0.53\sim 0.85 \text{ m/s}$ 、水深為 11~17 公分；斷面位置 3 的底床流速落在 $0.38\sim 0.52 \text{ m/s}$ 、表面流速為 $0.46\sim 0.70 \text{ m/s}$ 、水深為 14~19 公分。Geophone、Hydrophone 兩個感測器分別架設於渠槽斷面 3 至 4 中間位置及斷面 5 的位置，整體觀察泥砂運移作用的測

試渠槽長度為 7~8 公尺，總體實驗配置圖顯示於圖 13。



(地點:成大水工試驗所)

圖 13 室內渠槽試驗規劃及配置圖

	白球	黑球	紅球
			
重量(g)	180	160	140
直徑(cm)	6.5		
比重 (g/cm ³)	1.252	1.113	0.974

圖 14 三種不同密度之智能泥砂顆粒

室內單一智能泥砂顆粒球(smart rock)，在泥砂躍移實驗及自由落下撞擊底床試驗(drop experiment)，主要可以透過智能球的加速度紀錄來進行計算實際顆粒運動及力學參數，詳細說明步驟如下：(1)在自由落下試驗中，使用垂直分量加速度，人工挑選凸跳加速度訊號的峰值位置，計算其積分函數變成顆粒移動速度時序資料，利用峰值時間位置前後兩點速度資料，可以獲得泥砂顆粒實際碰撞底床的垂直入射(w_i)及反射後(w_r)的顆粒速率，即時計算實際公式(3)中的碰撞彈性係數 $C_1 = w_r/w_i$ ；(2)泥砂躍移渠槽試驗中，使用智能球之三軸向加速度的平方和並開根號(本計畫稱之為 $a(t)$)，配合攝影影像資料，判斷撞擊凸跳的次數及第一次與最後一次撞擊的時間差(本計畫定義此時間

差為 t_b ，泥砂顆粒躍移行為時間)，利用渠槽測試長度(7-8 公尺；實際躍移作用長度可以用攝影影像確認)與 t_b ，即可以計算實際平均推移質移動速度 U_b ；(3)另外，透過 $a(t)$ 函數峰值位置及峰值前後兩點計算其三點積分值($\delta v = v_r + v_i$)，其中 v_r 及 v_i 分別為正交於底床粗糙面的反射及入射碰撞速度，則可直接計算 v_i 如下：

$$v_i = \frac{\delta v}{(1 + C_1)} \quad (49)$$

在進行相關顆粒撞擊作用力之頻譜振幅計算時(公式(3))，可直接將式中的垂直撞擊速率 w_i 取代為 v_i ，為進階考慮非垂直碰撞情境；(4)另外，亦可以透過每組每次的實驗得到的 t_b 時間之機率密度分佈函數 p_b ，來導入機率式的震波躍移模型，過去皆是假設泥砂為隨機機率碰撞行為，本計畫的嘗試是一個很重要的研究課題；(5)關於公式(4)的路徑響應函數(Green' s function)，亦可以透過本計畫之自由落下敲擊試驗，直接求得渠槽路徑響應，本計畫稱之為 Flume Green' s function (G_F):

$$\begin{aligned} G_F(f, x_s; x_f) &= \sqrt{TP_{drop}^{obs} / F_{drop}(f, x_s; x_f)} \\ F_{drop} &= (1 + C_1) m w_i^{drop} \\ w_i^{drop} &= \sqrt{2gz^{drop}} \end{aligned} \quad (50)$$

自由落下的垂直撞擊速度可以直接由固定落放高度 40 公分來計算，質量 m 為智能球質量，即可計算實際的 G_F 。

透過本計畫規劃的室內渠槽試驗，原先震波物理模型在實際應用上主要的誤差來源，例如：係數 $C_2 \sim C_5$ 、泥砂粒徑(底床與躍移顆粒)及

躍移顆粒相關運動及力學經驗參數(C_1 、 U_b 、 t_b 、 L_b 、 w_i 、Shields stress)皆可以透過試驗數據來有效控制，因此，也額外提供機會讓本計畫來測試機率式與隨機式的震波躍移物理模型在實際進行 q_b 值預估成效的差異。考量粒徑為 D_{SR} (6.5 公分)單一智能球($N_{SR}=1$)撞擊河床產生織理論功譜能量密度 P_{SR} 為：

$$\begin{aligned} P_{SR}(f, x_s, D_{SR}; x_f) &= \frac{N_{SR} p_D(D)}{\bar{t}_b} \bar{F}(f, D_{SR}; x_f) \bar{G}_F(f, x_s; x_f) E(D) \\ &= \frac{N_{SR}}{\bar{t}_b} \left[(1 + C_1) \rho_s V_{SR} \bar{v}_i \right]^2 \bar{G}_F E(D) \end{aligned} \quad (51)$$

其中由於為單一粒徑，因此粒徑機率密度函數為 delta function， $E(D)$ 為撞擊效率係數(impact efficiency)，用以量化機率式及隨機式在功譜密度值上的表現差異，其定義如公式(52):

$$E(D_{SR}) = \frac{\int_{t_b} p_b(t_b) \frac{n_D}{t_b} F^2(f, t_b, D_{SR}) dt_b}{\frac{n_D}{\bar{t}_b} \bar{F}^2(f, D)} \quad (52)$$

實際上實驗中微地動觀測站可以記錄到觀測功譜密度值 P^{obs} ，配合智能球的加速度資料，利用公式(51)即可逆推試驗中的躍移泥砂顆粒總數量 N_{SR}^{inv} :

$$N_{SR}^{inv} = \frac{P^{obs}(f) \bar{t}_b}{E(D_{SR}) \left[(1 + C_1) \rho_s V_{SR} \bar{v}_i \right]^2 \bar{G}_F^2} \quad (53)$$

亦可以進一步預估試驗中的推移載通量 $q_{b,D_{SR}}^{inv}$:

$$q_{b,D_{SR}}^{inv} = N_{SR}^{inv} \frac{U_b V_{SR}}{W L_b} \quad (54)$$

公式(54)中的顆粒運動參數皆可以由智能球紀錄中實際觀測。

本計畫本年度已完成上述渠槽室內實驗，並於惠孫林場蘭島溪土砂試驗場進行實驗，為求穩定且大量的流量供應，透過在試驗渠道區上游建置簡易的堰堤可穩定且大量的供給實驗使用流量，試驗水源來自蘭島溪上游處之能高大圳排砂道，其為引水灌溉的地底水道，源頭來自北港溪上游之九仙溪，為處理淤砂問題，將淤砂藉由排砂道排向蘭島溪，其可為蘭島溪提供穩定的試驗水源；而針對砂石材料的部分，本研究將使用現地既有的砂石材料，首先經過篩分析後以固定的級配供給實驗使用。透過大尺度的履帶設備，可穩定的將土砂材料輸送至實驗渠道中。本試驗現地渠槽將於蘭島溪惠孫二號橋位置之河道進行，如圖 15 所示。利用現地自然蜿蜒河道進行整地工程建置一寬約 2~4 公尺、長約 30 公尺之現地渠槽，並且於該渠道上游開挖一蓄水池供實驗使用，渠道內部鋪設完整塑膠布防止水流入滲，並於塑膠布上方回填 30 公分厚之土方，提供自然的渠道底床條件，整體調查、量測及監測儀器配置分布如圖 16。表 1 顯示實驗監測、調查與工程施作設備。

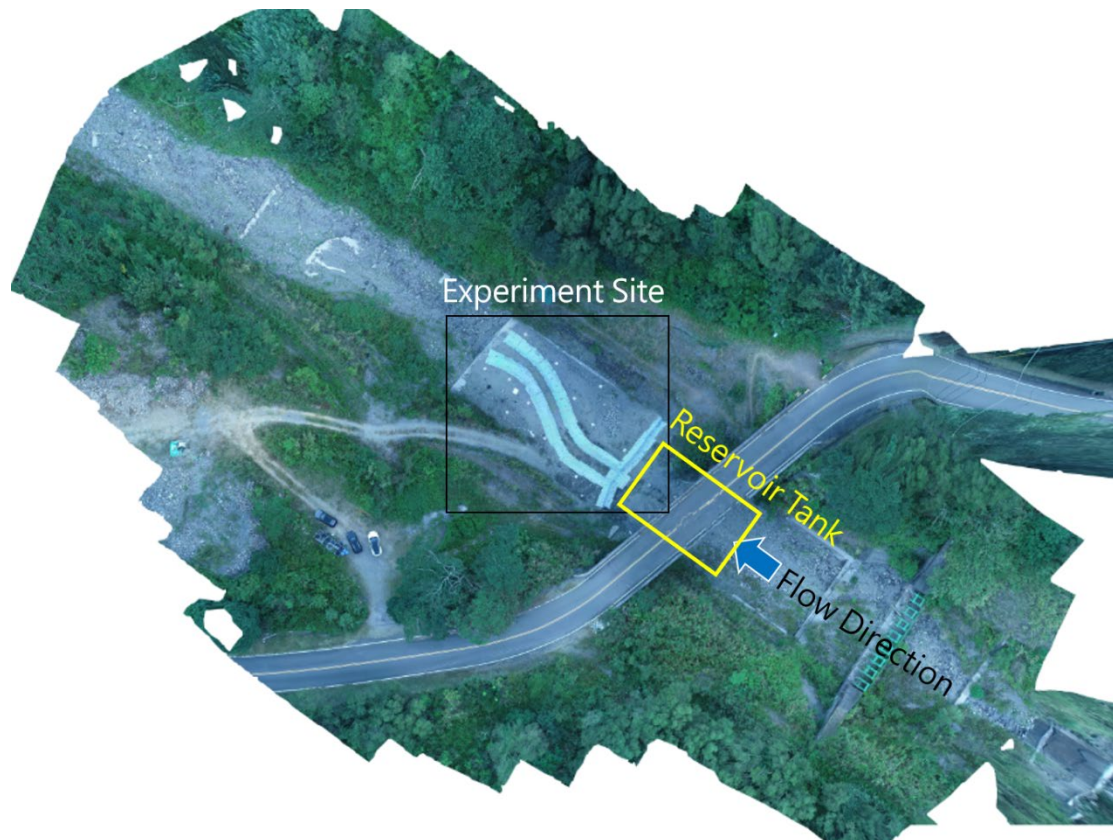


圖 15 實驗場地配置圖

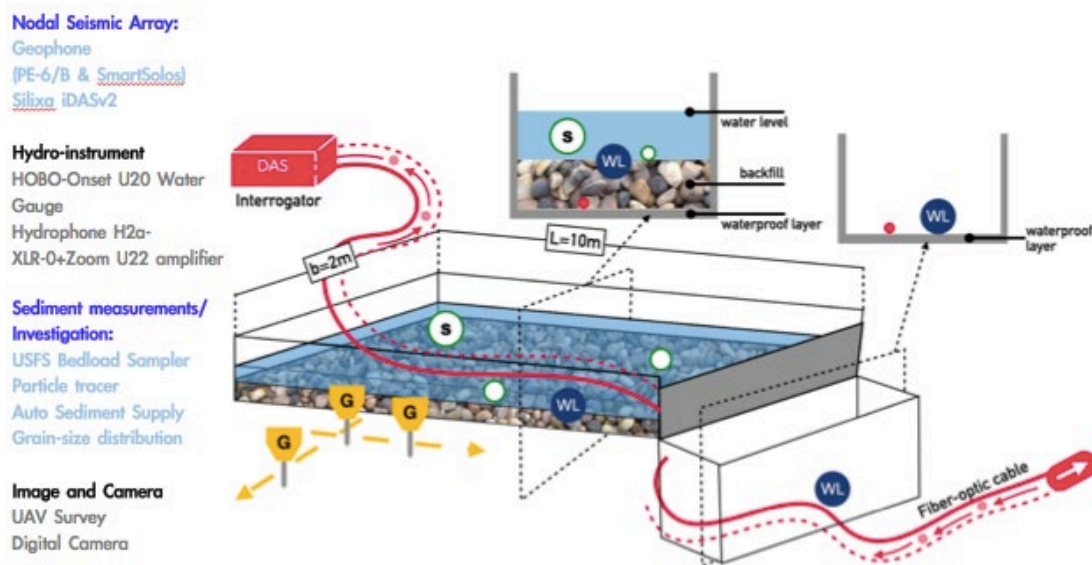


圖 16 試驗調查與儀器配置示意圖

表 1 實驗監測、調查與工程施作設備

項目	儀器參數設定	紀錄物理量	儀器數量
感震器, Nodal Seismic Array			
● 4.5Hz PE-6/B Geophone+ DataCUBE(三軸向)	16bit、400Hz sampling rate with real-time data stream	Ground velocity	共計 1 部
● SmartSolos (IGU15,5Hz 三軸向)	24dB, 500Hz sampling rate		共計 48 部
● Silixa iDAS-v2	10m Gauge length、1k Hz sampling rate、1m Channel spacing	Strain of Riverbed	共計 150m
水文量測, Hydro-instrument			
● HOBO-Onset U20 Water gauge	1 Hz Sampling rate	Pressure	Upstream Riverbed 1 部 Riverside as reference 1 部
● Hydrophone H2a-XLR-0 + Zoom U22 amplifier + 30 m cable length (自製)	20k Hz sampling rate	Acoustic noise	共計 1 部
泥砂量測與調查, Sediment measurements/Investigation			
● USFS Bedload Sampler (掛網式)	試驗期間 1~3 次	Mass rate	待定
● Particle tracer (自製)	1k Hz sampling rate	Impact force and frequency、trajectory	19 顆感測器 100 顆樣本顆粒
● Auto-Sediment	待定	待定	

Supply			
● Grain-size distribution: image photo and volume method	試驗前後	Grain Size	試驗渠床、水槽區域
相機與攝影影像, Image and Camera			
● UAV Survey	試驗前後、Resolution 3cm/pixel	DEM and Ortho-image	共計 1 部
● Digital Camera	60 fps	Surface Flow Velocity	至少 3 部
其他設備, Other equipments	Pumping/250EFB622, 30HP、揚程 15m、流量 0.1 cms	Stable Water Supply	待定
	Excavator	Experiment Channel and water tank	待定
	Fiber Cable: 2 single-mode and 2 multi-mode	Multi-mode is for DTS	Fiber Cable: 2 single-mode and 2 multi-mode

第三章 工作執行成果

第一節 室內渠槽試驗成果

本計畫持續進行室內渠槽試驗數組，執行成果主要聚焦於多顆礫石粒子追蹤器(又稱之為智能球, smart rock)與不同的運動行為(saltation and rolling)於微地動訊號之功譜密度 PSD 特徵(微地動測站位置安裝於斷面 3 至斷面 4 之間)、智能球記錄之加速度時序資料及水聲計紀錄(本計畫自制自記式的格式為 wav 檔且取樣率為 44,100 Hz; 位置安裝於斷面 5)的變化趨勢。另外，過去智能球的時間取樣間距有過大問題(分別為 0.0346 秒及 0.1268 秒)，由於上述間距通常會大於顆粒撞擊渠槽底床的接觸時間，導致在利用加速度時序資料進行一次積分求得的速度時序資料，無法獲得顆粒碰撞接觸底床的入射速度(W_{inc})及反彈速度(W_{ref})，因此本年度將時間間距縮小至 0.00667 秒(目前受限於硬體設計限制)，持續測試智能球丟擲底床試驗。關於微地動訊號時頻分析，本計畫於執行第一年已完成建置即時監測分析程序，相關即時分析成果皆可直接顯示於網頁伺服器，網址位置為 <http://140.113.21.54/DEMO/DEMO.html>。

關於單一顆粒的跳躍作用行為的相關監測資料成果，在此利用黑色智能球(比重為 1.113 g/cm^3)於底床均勻粒徑 20 mm、坡度 1.04%、斷面 1 底床流速為 0.69 m/s 及水深條件為 11 cm，相關即時微地動時

頻分析成果如圖 17 所示，可以觀察到於丟擲產生的撞擊造成的地動訊號可出現在 30 秒位置，且頻率範圍為 35 Hz 至 43 Hz，在平均 PSD 時序資料中亦可以看到清楚的 PSD 峰值，其大於 -100 dB。關於本計畫自制的水聲計與智能球時序資料將合併進行綜合成果解釋，關於智能球的加速度資料將進行三軸向加速度值平方和相加後開根號，因此加速度資料背景基線應等於 9.81 m/s^2 。根據圖 18 的成果顯示水聲計除了可清楚記錄丟擲的撞擊訊號以外，亦可以記錄後續顆粒跳躍撞擊的訊號(約於 40 秒位置)，由於丟擲顆粒的位置在斷面 0，其距離斷面 5 為 5 公尺，因此可以估算智能球從丟擲後運移到水聲計位置大約平均速度為 0.5 m/s ，從智能球的加速度時序資料亦可以判斷主要的撞擊次數有 6 次(圖 18 中圓圈，其為滿足加速度值大於 20 cm/s^2)。由此試驗，本計畫認為單一顆粒的試驗，水聲計相對於微地動儀器更容易記錄顆粒跳躍行為產生的訊號。圖 19 則顯示 6 顆黑色智能球同時丟擲試驗的成果，試驗期間在斷面 1 底床流速為 0.69 m/s 及水深條件為 11 cm，其在丟擲撞擊作用產生的平均 PSD 值明顯比單一顆粒試驗還大，其值可達 -92 dB 且產生的頻率範圍變得更寬，亦可以在智能顆粒通過微地動觀測儀斷面時(約 39 秒位置)觀察到 80 Hz 至 90 Hz 的能量集中，本研究認為其為多顆粒同時進行試驗時，顆粒之間的碰撞情形所產生的高頻訊號，而這過程中亦有可能產生顆粒間摩擦的消能情境。

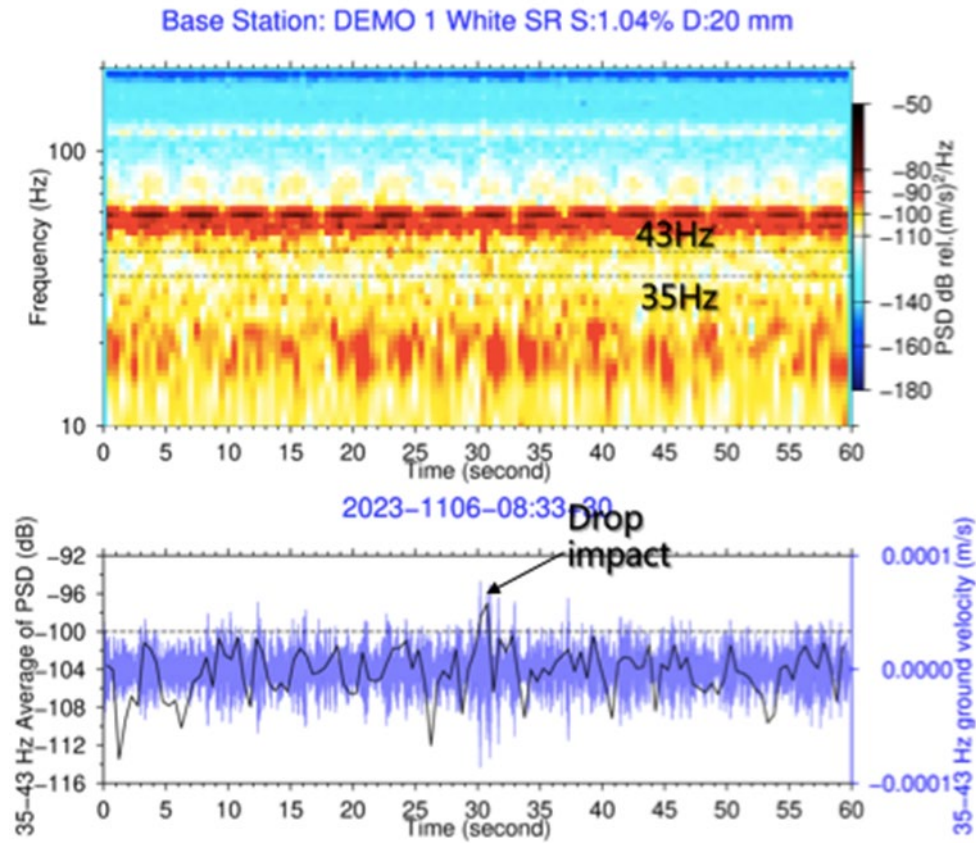


圖 17 單顆智能球之平均 PSD 時序與時頻圖

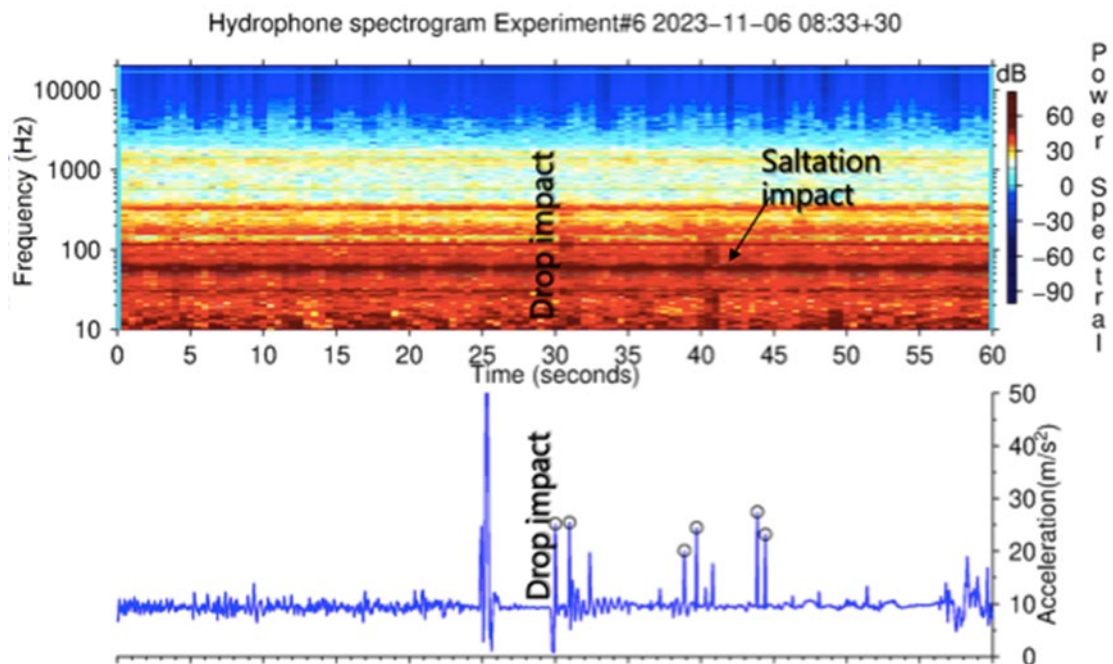


圖 18 水聲紀錄時頻圖與智能球加速度時序

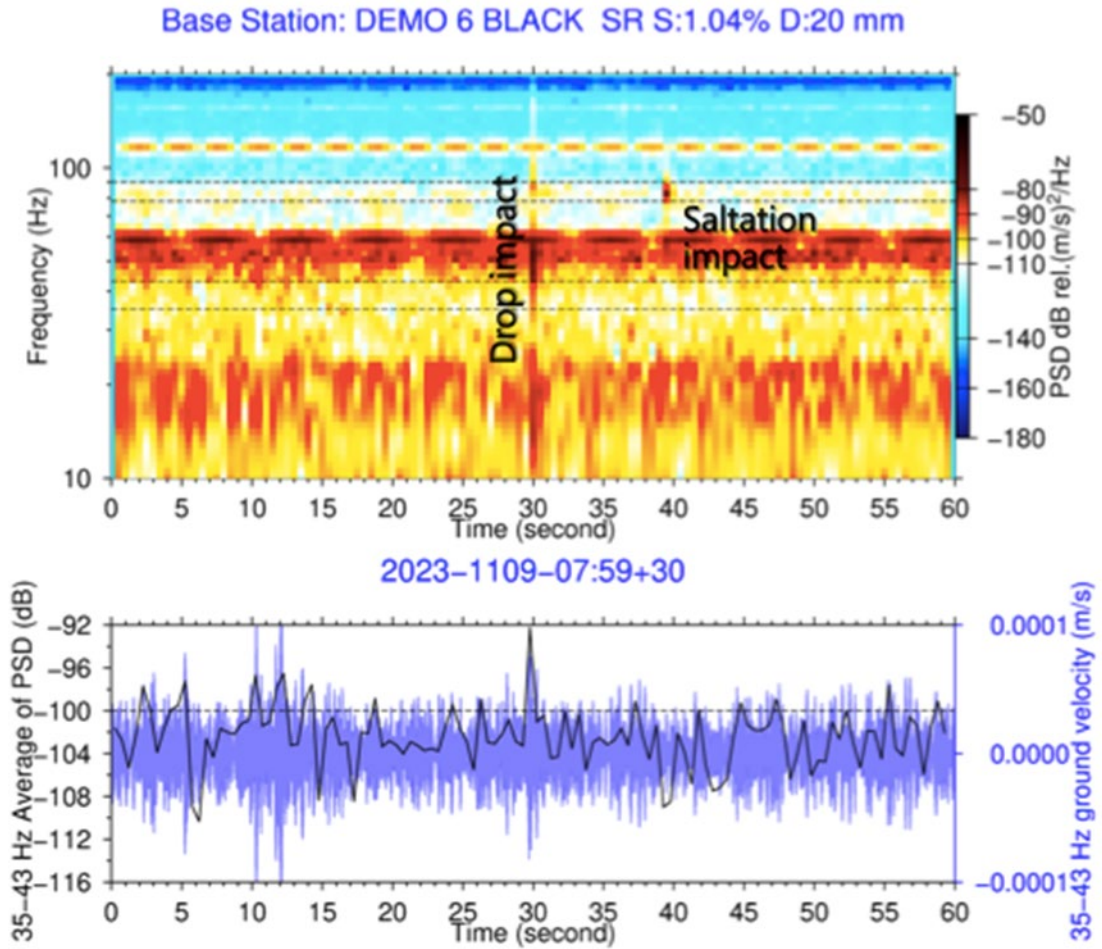


圖 19 6 顆智能球試驗之平均 PSD 時序與時頻圖

針對顆粒滾動試驗的觀察，本計畫使用白色智能球(比重為 1.252 g/cm^3)於底床均勻粒徑 20 mm 、坡度 1.04% 進行試驗。圖 20 可以觀察到智能球在加速度時序資料的撞擊次數顯著大於跳躍試驗，除了丟擲撞擊作用的訊號特徵以外，亦可以分別在平均功譜密度 PSD 時序資料與水聲計紀錄時頻圖中發現明顯訊號出現於 38 秒與 47 秒，其可能分別代表智能球通過微地動觀測儀及水聲計安裝位置的時間，其運移的平均速度約為 0.167 m/s ，相較於跳躍試驗慢。

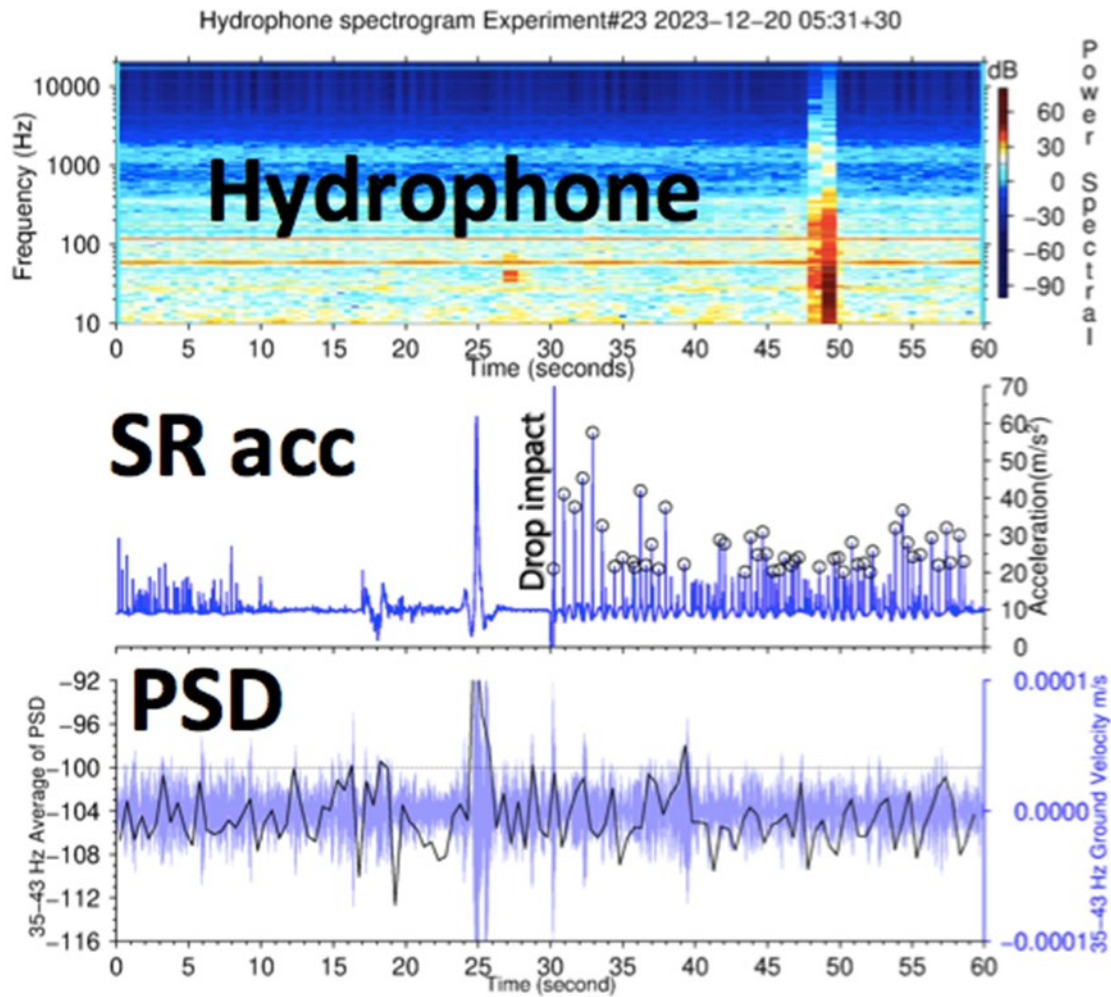


圖 20 單顆智能球試驗之平均 PSD 及加速度時序資料與水聲計時頻

圖

本計畫室內渠槽試驗可以有效控制底床粒徑、運移泥砂之運動參數(碰撞速度、次數)、震波格林函數及非彈性碰撞恢復係數(C_1)，並測試各家泥砂顆粒運動及力學經驗式之適用性。

第二節 分散式光纖感測器測試與分析方法建立

分散式光纖感測器(Distributed acoustic sensing; DAS)的感測原理為 DAS 主機接上單模光纖，由主機送出波長 1550nm(雷利)的雷射脈衝，沿途雷射光經過光纖製造過程的雜質，可產生 Rayleigh scattering，後散射光可返回到 DAS 主機，其中散射傳遞的時間與散射發生位置成正比，因此，量測雷射光在傳遞中的相位變化即可獲得空間中特定位置的應變(strain)，且此形變為沿著光纖纜線的方向，其有別於傳統地動感知器，地震儀主要記錄三軸向地動速度值。一般而言，光纖主機量測到的相位資料乘上特定轉換常數(本研究使用的常數為 11.6×10^{-9} 再乘上取樣率 1,000Hz)即可獲得相對應變(relative strain)，並透過時間微分計算可求得應變率(strain rate)，應變率再進行空間積分計算，即可獲得速度場資料，上述速度場資料即為傳統地震儀的紀錄。過去，地震儀已廣泛地被應用於量測水流作用、河床載作用、土石流事件等震源所產生的地動訊號，且皆以非接觸式的概念進行監測應用(例如：地震儀皆安裝於河道兩岸)。本計畫預計將光纖安裝於野外試驗場的底床中及試驗和渠道的岸邊，嘗試記錄渠槽試驗過程中可能的水流作用及相關泥砂顆粒運作所造成光纖的應變紀錄。在此，亦以條列方式逐點說明 DAS 在監測應用上的優勢：(1)雖然 DAS 主機本身單價高，但是若是考量長距離的觀測(數公里至數百公里)，光纖纜線因應不同

Gauge length 的設定轉換成觀測站點數量後，會比佈設傳統地震儀划算許多、(2)高時間取樣率，可達 400 Hz 至 100 kHz、(3)光纖可安裝於惡劣環境，特別是其可耐高溫，易應用於井下觀測。

本試驗使用 DAS 設備為 Silixa iDAS-v2，其配置為 10 公尺 gauge length，儀器取樣頻率為 1k Hz，輸出頻道間距為 1 公尺，整體 DAS 測線總長約為 150 公尺。該儀器受限於輸出頻道間距影響，無法於室內渠槽試驗進行分析及率定工作，因此，本計畫在室外渠槽未整理完備前，先利用其他場域相同設備的資料來進行 DAS 資料分析方法的建立作業。在此使用的測試資料來自於芮氏規模 7.2 之 0403 花蓮地震的主餘震序列。在針對地震分析而言，地震波波相挑波與定位演算法為重要兩大步驟，在挑波程序中，由於光纖與地震儀資料特性的不同，過去以地震儀資料建立的機器學習挑波器(例如：PhaseNet、Eqtransformer)並不能直接應用於光纖資料。因此，本計畫將優先測試適用於光纖資料的新挑波器(Semi-supervised learning-PhaseNet-DAS; Zhu et al., 2023, 圖 21)，並且同時完成分析程序之初步測試。本計畫蒐集 2023 年 05 月 04 日的光纖資料，利用 PhaseNet-DAS 進行挑波，成果顯示除了可清楚的偵測到中央氣象署目錄之地震事件，亦可以偵測到未包含在目錄中的地震事件，圖 22 顯示中央氣象署目錄中 05 月 04 日 16 時 55 分 21 秒之 P-wave 及 S-wave 挑波成果，圖 23 亦顯示

為包含在目錄中的地震事件(12 時 02 分 30 秒)之挑波成果，皆可以清楚的偵測到 P-wave 及 S-wave。透過上述的測試可以理解光纖資料的處理方式，然而本計畫的渠槽試驗期間施作的 DAS 感測資料可能不會有清楚的 P-wave 及 S-wave 訊號，主要目的還是探究泥砂運移及水流作用之下的 DAS 資料樣態。

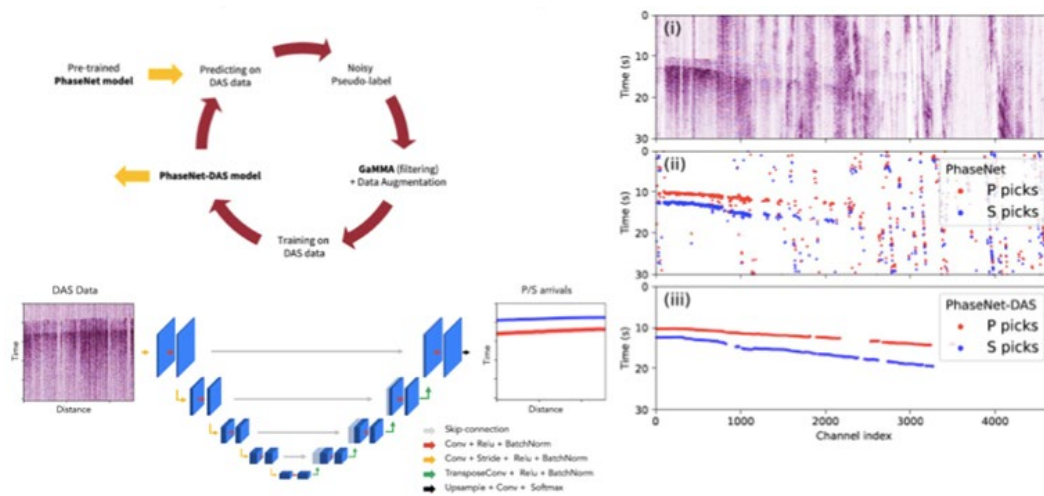


圖 21 PhaseNet-DAS 挑波器分析示意圖

(Zhu et al., 2023)

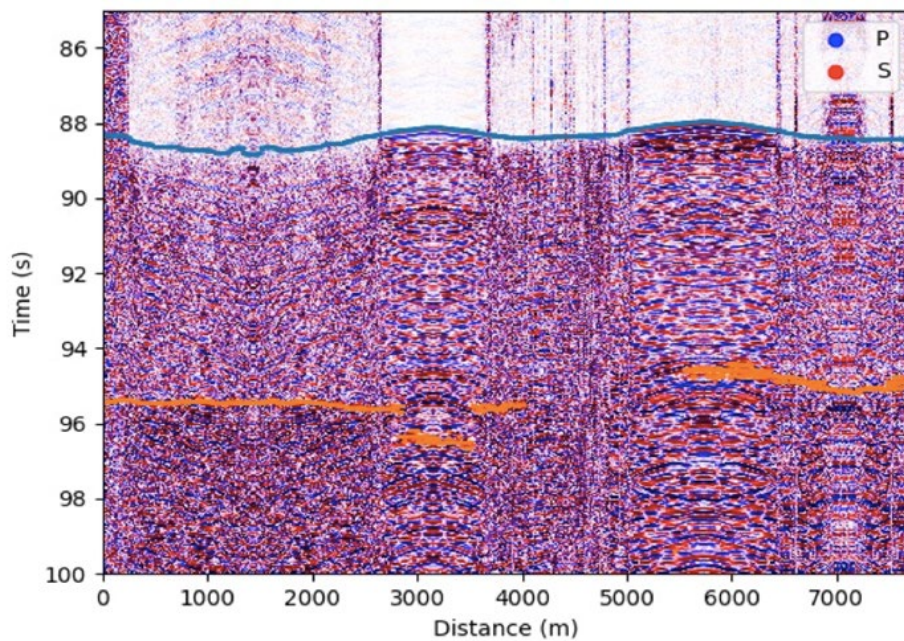


圖 22 中央氣象署地震案例之 PhaseNet-DAS P-wave 及 S-wave 挑波
成果

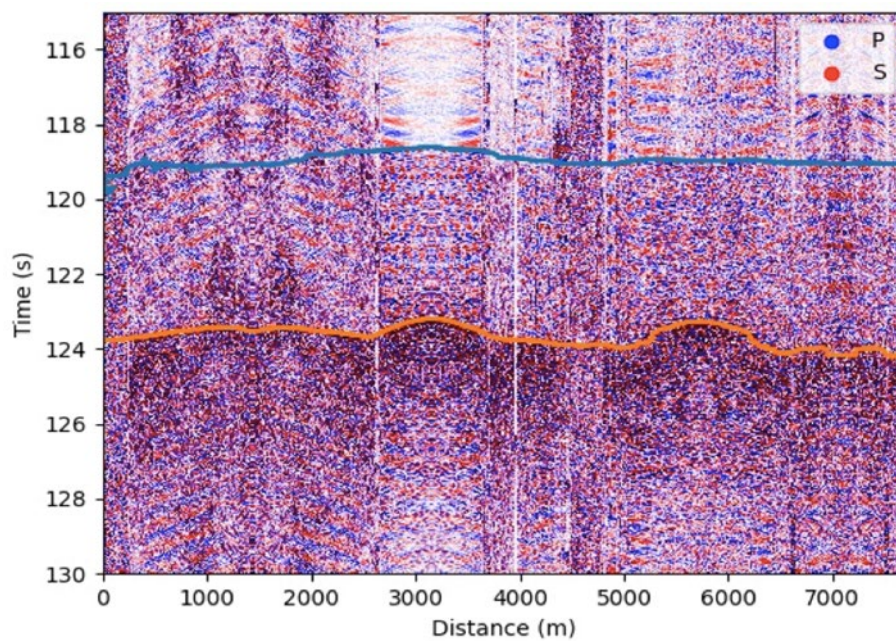


圖 23 非中央氣象署地震案例之 PhaseNet-DAS P-wave 及 S-wave 挑
波成果

第三節 主被動表面波震測法施作測試

今年度本計畫優先選擇河床灘地位置進行主被動表面波震測法施作測試，主要利用橋面臺丟擲混凝土磚試體，密度約為 $2,300 \text{ kg/m}^3$ ，預估撞擊河床可產生的動能介於 25 至 500 kJ，這可以改善傳統敲擊震源能源不足的問題(圖 24)；另外，亦可以進行測試新式微地動感震器，本計畫主要使用的感震器類型為 SmartSolos (IGU16, 5G) all-in-one 三軸向 Geophone(圖 25)，其整體設備運作耗功率約 0.14Watt，內含 128 GB 資料儲存空間，單獨使用內部電池可以連續運作 15 天，自然頻率為 5 Hz，儀器敏感度微 80 Volt/m/s，本測試所使用的儀器放大倍率為 12 dB、取樣率為 1,000 Hz，測線長度規劃 510 m，測站間距為 30 m(圖 25)。目前已於 6 月 25 日至 26 日完成資料搜集，後續待期末階段交付分析成果。主/被動表面波震測法在野外河床施作的可行性必須被完整的測試過，該調查項目可以有效的提供震波物理模型中計算格林函數支重要參數 $C_2 \sim C_5$ (詳見第二章第一節內容)。

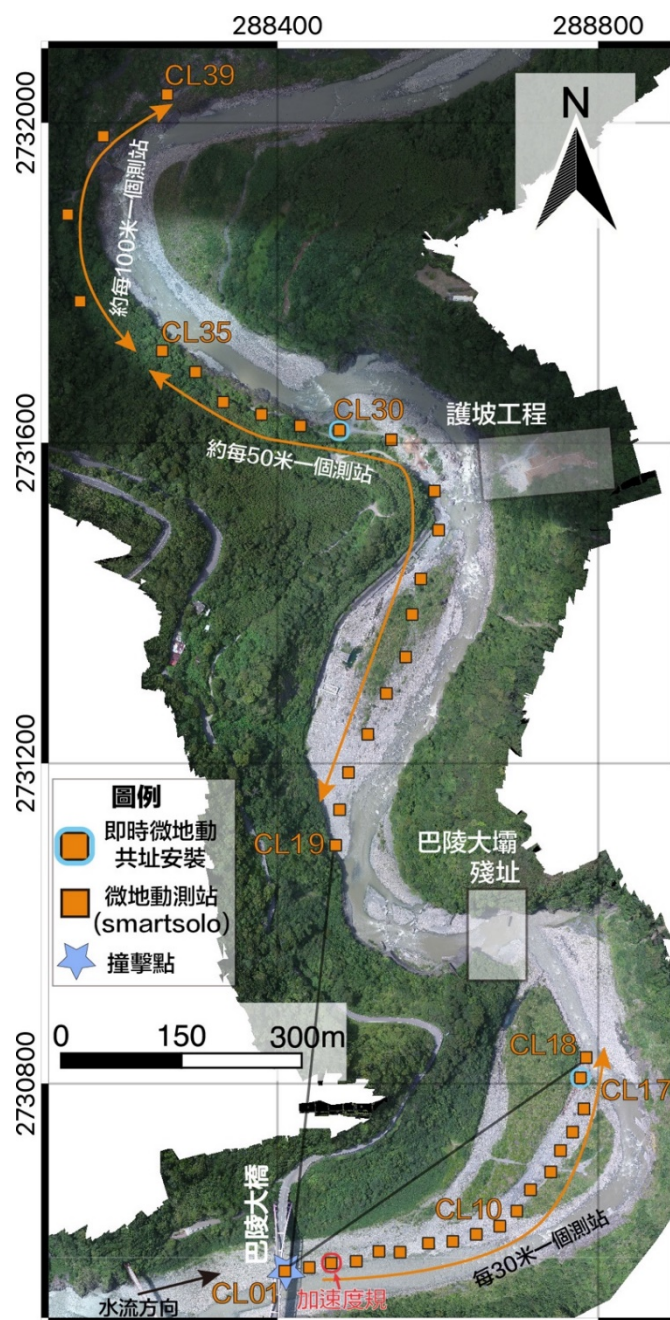


圖 24 試驗之撞擊、微地動儀器位置示意圖

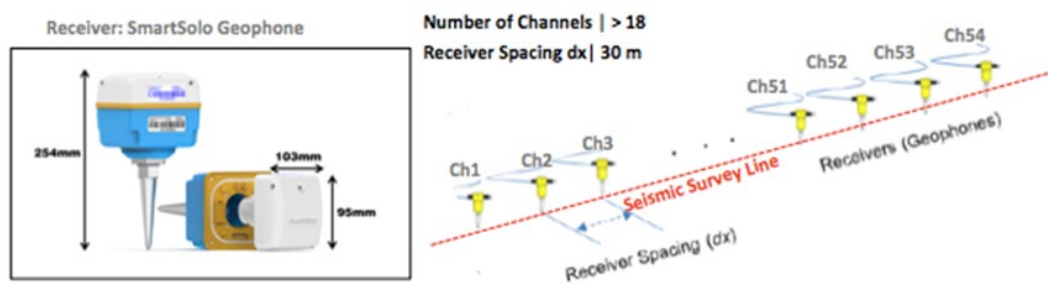


圖 25 儀器規格尺寸及測線施作示意圖

第四節 新式 RGBD 深度影像之粒徑分析法

在野外槽渠試驗地進行，能夠有效的控制床質粒徑亦是一件重要的關鍵課題。本計畫持續精進與測試新型影像資料: RGBD 深度圖像，以及基於測試深度學習模型之邊緣檢測分析法。計畫測試使用的深度相機為「Intel RealSense depth camera D435」，然而原始的深度影像是必須經過深度校正的，經過對齊校正後的深度照片其對應的深度值才可作為後續分析使用(圖 26)。本研究開發的分析方法稱為 RGBDgrains，初步將本研究方法成果與傳統機器學習法(K-means 為主之 Pebblecounts; Purinton and Bookhagen, 2019)及深度學習法(Imagegrains; Mair et al., 2023)進行比較，結果顯示 RGBgrains 對於大粒徑顆粒(照片中相對具有深度值)的辨識能力較強；而 Pebblecounts 卻易有錯誤群聚成單一顆粒現象發生，Imagegrains 則對於小粒徑顆粒掌握度較高，但是對於大顆粒粒徑辨識能力較差(圖 27)。因此，本計畫提出整合 RGBDgrains 及 Imagegrains (深度相機資訊配合機器學習及深度學習辨識模型)可以更加完整的取得河床質粒徑分佈特性，其特別適用於卵礫質之護甲層河床(圖 28)。

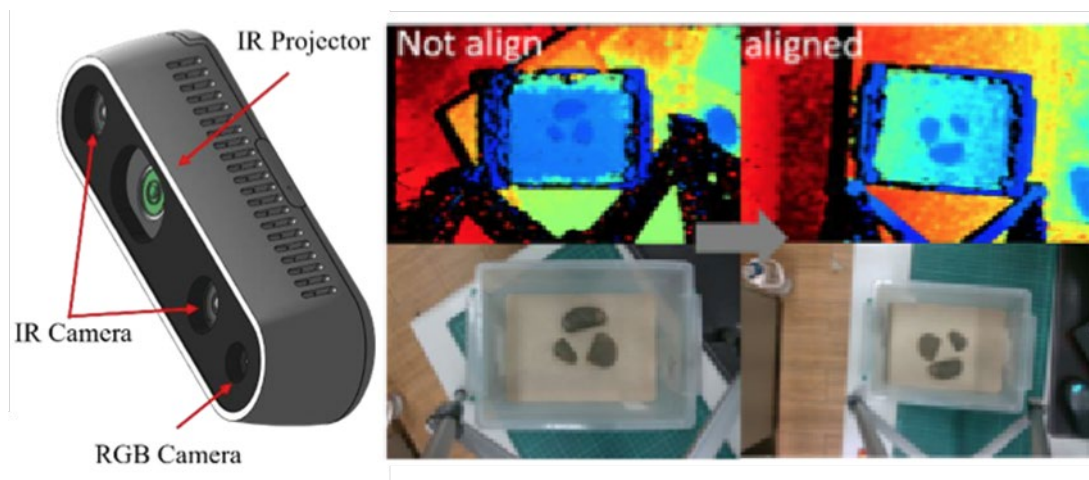


圖 26 RGB-D 相機與對齊校正前後影像

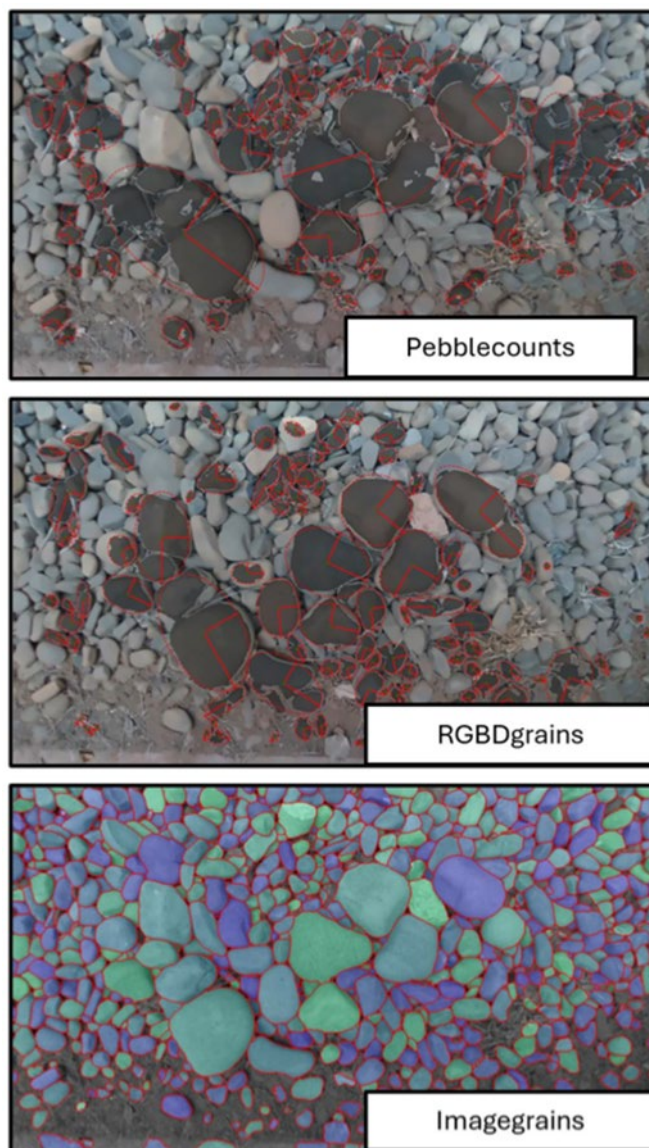


圖 27 顆粒粒徑擬合比較結果

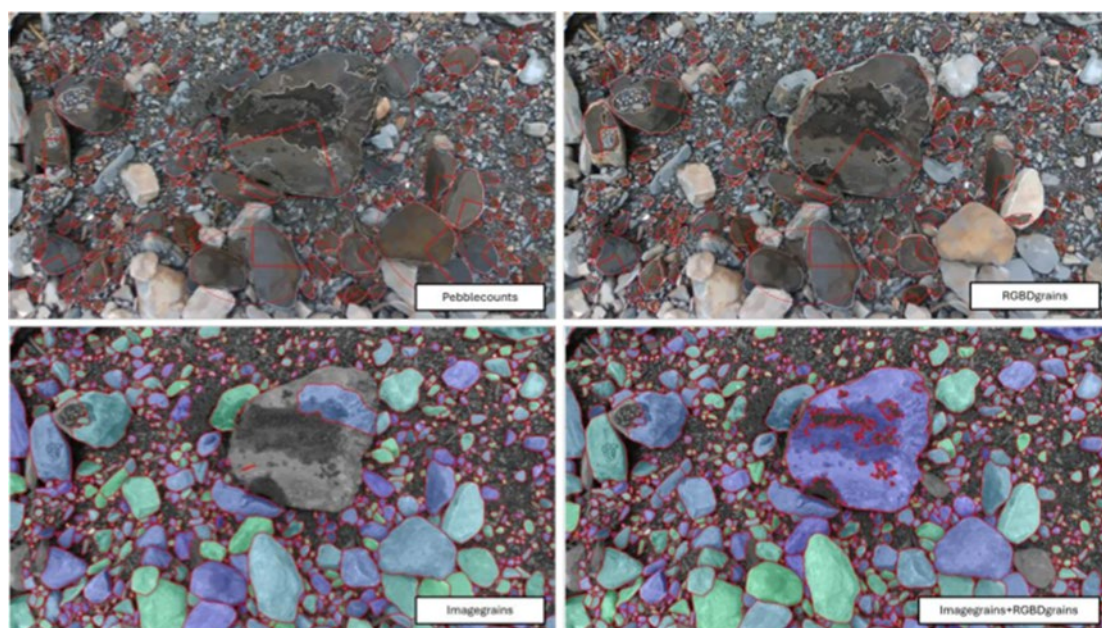


圖 28 粒徑擬合成果比較

第五節 自記式野外水聲計設計

去年度計畫執行開發的自記式水聲計可能無法直接應用於現地渠槽試驗，本計畫今年度持續測試儀器並嘗試強化水聲計的抗撞強度，主要設計概念以不鏽鋼管套住水聲計的感測器，並以防水封膠將其密封於鋼管中，並利用 U 型固定器將套過鎖在穩定的物體上，詳細如圖 29 所示。

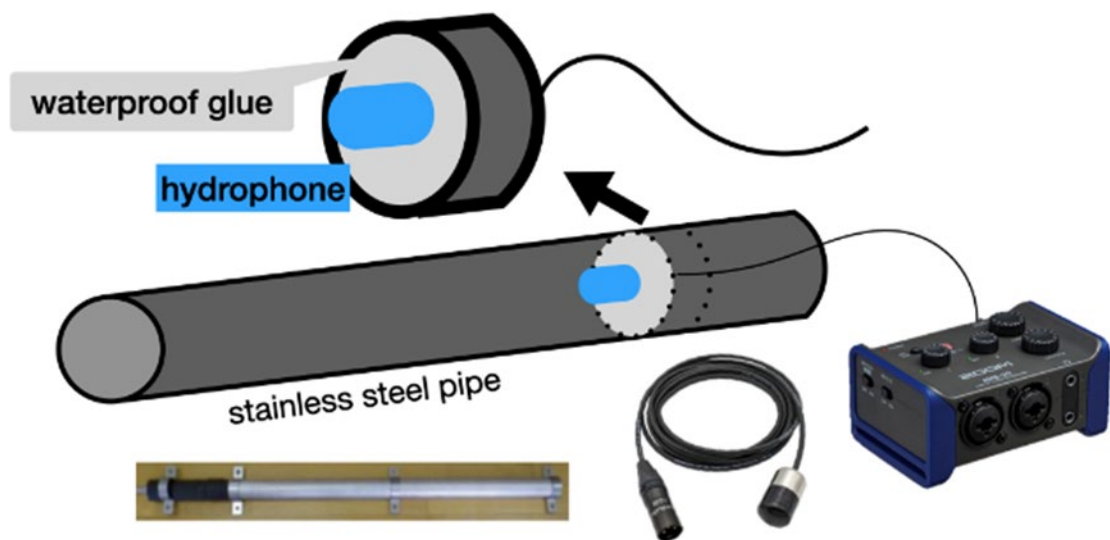


圖 29 水聲計設計示意圖

第六節 野外渠槽試驗成果

本年度計畫執行期間受到兩起颱風事件影響(7 月份凱米颱風、9 月份山陀兒颱風)導致試驗現場渠道整理工程進度受到延遲，僅於 10 月 20 日順利完成野外渠槽試驗一次。本年度選定惠孫林場的蘭島溪惠孫二號橋作為實驗渠道區域。試驗區天然蜿蜒渠道長約 30 公尺，坡度平均為 4° 且渠道斷面為梯形堰，底床寬為 2 公尺、頂寬為 3.8 公尺、深度約為 1 公尺，最大通洪斷面積約為 2.9 平方公尺(圖 30 中的紅色線條為試驗前的河道斷面地形)。相關儀器配置為渠道左岸微地動測站 18 部(圖 30，黑色倒三角形，編碼 CL01 至 CL18)、右岸微地動測站 17 部(圖 30，黑色倒三角形，編碼 CL19 至 CL35)、渠道底床及河岸灘地之 DAS 纜線，總長 150 公尺，由上游蓄水區固床工熔接處位置開始接回光纖主機(圖 30、DAS interrogator)，DAS 纜線空間分佈情形如圖 30 中黑色線條顯示，在渠道中佈放於防水布之上並以 30 公分厚的土砂層進行覆蓋，其於河岸灘地處的 DAS 纜線則以簡易土方進行覆蓋固定。為了釐清河床質撞擊產生的訊號時頻特徵及震波傳遞衰減特性，本研究沿著渠道底床進行一系列的人工敲擊試驗，共計有 20 處敲擊位置(圖 30，空心矩形，編碼 IM01 至 IM20)，並以垂直於渠道水流方向之微地動觀測站之數據進行相關分析(圖 30，紅色倒三角形，編碼 CL36 至 CL48)。智能球(smart rock)投擲位置落在右岸

微地動測站 CL24 臨近位置，並於渠道下游出水口處進行攔網架設，以對智能球進行回收作業，本試驗之自製水聲計亦安裝於出水口處的固床工結構上，如圖 30 所示。

透過惠蓀二號橋臺面視角拍攝試驗期間的渠道及上游水源入流現象，可以將試驗分成 A 至 G 七個重要試驗階段與情境照片(圖 31)：

(A)上游水源由蓄水區開始溢淹至試驗渠道、(B)入流水前緣抵達下游出水口水聲計位置處、(C)智能球丟擲至渠道時間點、(D)保麗龍球丟擲至渠道時間點、(E)上游水源入流狀況、(F)渠道流況持續維持在高流量的狀態、(G)渠道下游出水口處之流況情形。

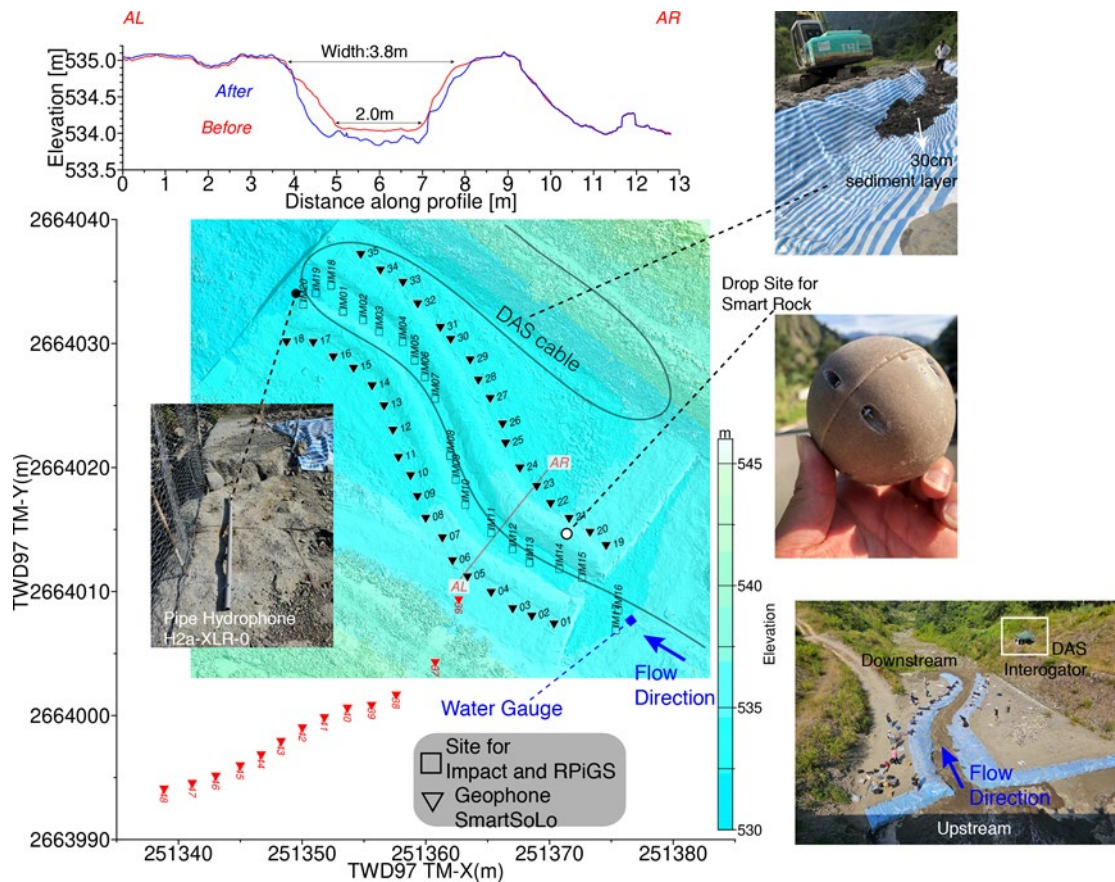


圖 30 試驗區儀器配置與調查點位分布情形

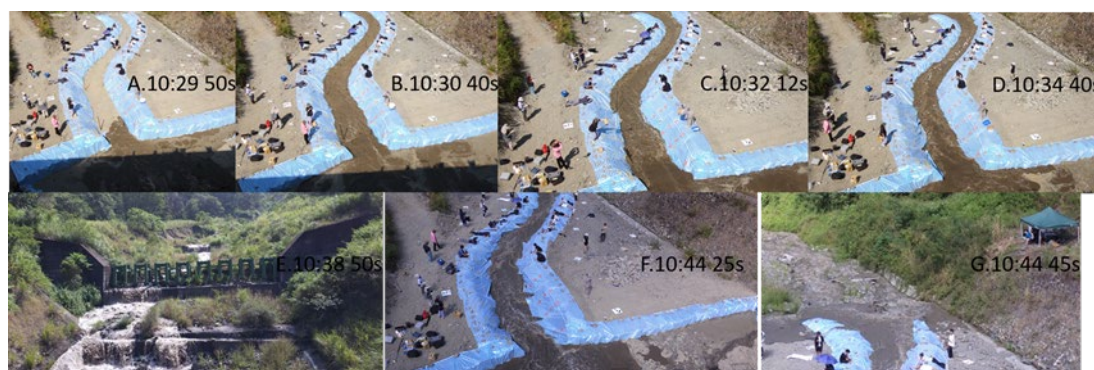


圖 31 七個試驗階段與情境照片

1. 底床沖淤變化與粒徑分析成果

本研究利用自行開發之 AI-RPiGS-Scanner 手持式粒徑掃描儀器進行即時粒徑調查分析，在進行粒徑調查之前會因應不同河床質粒徑條件選擇不同尺寸的標準粒徑樣板(195mm 與 320mm)，粒徑樣板的用意是可以實際率定現場拍攝照片的解析度、拍高等參數，且通常會將拍攝照片之中心位置對準標準粒徑樣板進行照片拍攝，圖 32 為團隊自行開發掃描儀之野外調查流程圖。圖 33 顯示為試驗前渠道上游至下游的四處粒徑調查照片與粒徑曲線分析成果，影像之中心位置的標準粒徑樣板有黃色圓圈線條為演算程序自動找尋到的標準粒徑邊界，當黃色圓圈線條與實際粒徑板邊界完全吻合，代表粒徑分析的成果俱有高度可信度；影像中的藍色遮罩部分為深度學習模型自動辨識之河床泥砂顆粒，並根據偵測之顆粒幾何邊界進行橢圓擬合，可以獲得粒徑之長軸(a 軸)與短軸(b 軸)，本研究後續粒徑曲線分析統一使用

b 軸長度進行計算。由於在野外即時操作時，並無法每一次都固定拍攝高度進行調查，因此，不同的調查點位可能存在不同的拍高，亦導致每一張拍攝影像有不同的照片解析度及實際照片尺寸，如圖 33 分析結果中解析度介於 0.510mm/pixel 至 0.538mm/pixel，照片實際空間尺寸為介於 1.286×1.286m² 至 1.356×1.356 m²，每一次調查自動偵測的粒徑顆粒數量介於 585 個至 937 個，代表中位粒徑 D₅₀ 介於 10.2mm 至 11.8mm、D₈₄ 介於 18.6mm 至 21.0mm，最大粒徑大小為 146.6mm。

利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型(2)

調查資訊	調查位置	裝置代碼	RPIGS-Scanner		
	起點座標經度:	緯度:	高程:		
	終點座標經度:	緯度:	高程:		
	調查日期 年 月 日	結束日期	年 月 日		
	開始時間 點 分	結束時間	點 分		
	記錄人員	工作人員			
調查前置作業	☐ 鏡頭型號 ☐ V2.1 ☐ V2(B) ☐ ArduCam ☐ 標準粒徑樣板尺寸 ☐ 195mm ☐ 320mm ☐ WIFI連線設定 <code>wpa_supplicant.conf</code> : 網路名稱 _____ 密碼 _____ ☐ 確認浮動IP Address: _____ ☐ 確認是否已啟動WebServer: <code>/var/www/html</code> ☐ 主要工作目錄位置: _____ ☐ 主要工作目錄下存在檔案: <code>photo.py</code> & <code>remotecontrol.py</code> ☐ 主要工作目錄下存在目錄: <code>manual_circle_detection</code> , AIF ☐ 確認目錄 <code>manual_circle_detection</code> 中檔案: <code>circle_manualimg_test.py</code> , <code>circle_all.py</code> ☐ 確認目錄 AIF 中檔案: <code>Ostu_thresholding.py</code> <code>PCfunctions.py</code> <code>PebbleCountsAuto.py</code> <code>single_csv_and_plot.py</code> <code>PebbleCountAll.py</code> ☐ 設定 <code>photo.py</code> 參數: <code>-h</code> _____ <code>-w</code> _____ <code>-t</code> _____ (image size/time lapse) ☐ 設定 <code>remotecontrol.py</code> 參數: <code>host_name</code> : _____ <code>host_port</code> : _____ ☐ 確認主要工作目錄是否存在資料夾目錄 RPIGS ☐ 連接自拍棒: 連接行動電源				
	調查作業步驟	☐ Step1.1: 連線RPIGS-Scanner (手機APP, Terminus) ☐ Step1.2: 進入主要工作目錄並執行, <code>python photo.py</code> ☐ Step1.3: 開啟手機網路瀏覽器, 輸入網址與PORT進行連線 (<code>http://xxx.xxx.xxx.xxx:port</code>) ☐ Step2.1: 將RPIGS複製到目錄 <code>manual_circle_detection</code> ☐ Step2.2: 開啟 <code>circle_mannualimg_test.py</code> , 設定相關參數 <code>minR:h/___; maxR:h/___; minDist:h/___; dp:___</code> ☐ Step2.3: 執行 <code>python circle_manualimg_test.py -im</code> _____ (任選一張) ☐ Step2.4: 動態調整相關參數並重複步驟Step2.3, 直到可以快速且正確找到標準樣板: 照片檔名 時間_解析度_mmperpx_拍高_m_真實照片尺寸_m.jpg -> 為AIF分析的輸入照片 <code>時間_解析度_mmperpx_拍高_m_真實照片尺寸_m_raw.jpg -> 人工檢核使用</code> ☐ Step2.5: 開啟 <code>circle_all.py</code> 並設定輸入照片路徑path, 內建path='RPIGS' ☐ Step2.6: 執行 <code>python circle_all.py</code> ☐ Step3.1: 複製步驟Step2.6的輸出圖檔至目錄AIF ☐ Step3.2: 執行 <code>python Ostu_thresholding.py -im</code> _____ (任選一張照片) 須使用筆電進行互動Window Display, 選取最佳的Ostu門檻百分比% ☐ Step3.3: 執行 <code>python PebbleCountsAuto.py</code> 相關參數設定可以參考 <code>example.run.script</code> <code>-im (圖檔名稱) -input_resolution (圖片解析度) -first_n1_denoise (高斯平滑) -otsu_threshold (Ostu%) -min_size_threshold (最小粒徑面積,px) -misfit_threshold (橢圓擬合度) -percent_overlap (可允許的重疊率) -cutoff (最小短軸長度,px) -tophat_th (0.9) -sobel_th (0.9) -canny_sig (2)</code> ☐ Step3.4: 確認Step3.3輸出結果並動態調整分析參數, 直到可以找到畫面中大部份的粒徑 ☐ Step3.5: 開啟 <code>PebbleCountAll.py</code> , 參考步驟Step3.4的最佳參數並進行參數更改 (para3, para4) ☐ Step3.6: 執行 <code>python PebbleCountAll.py</code> 即可自動化分析所有的輸入照片檔 (檔案位置於 <code>PebbleCountAll.py</code> 中的path參數進行設定)			
		室內作業	☐ 室內重新執行步驟Step2至Step3 ☐ 已完成步驟Step1所拍攝的照片進行備份		
			其他 (天氣、河床狀況)		

圖 32 RPiGS-Scanner 野外調查流程表

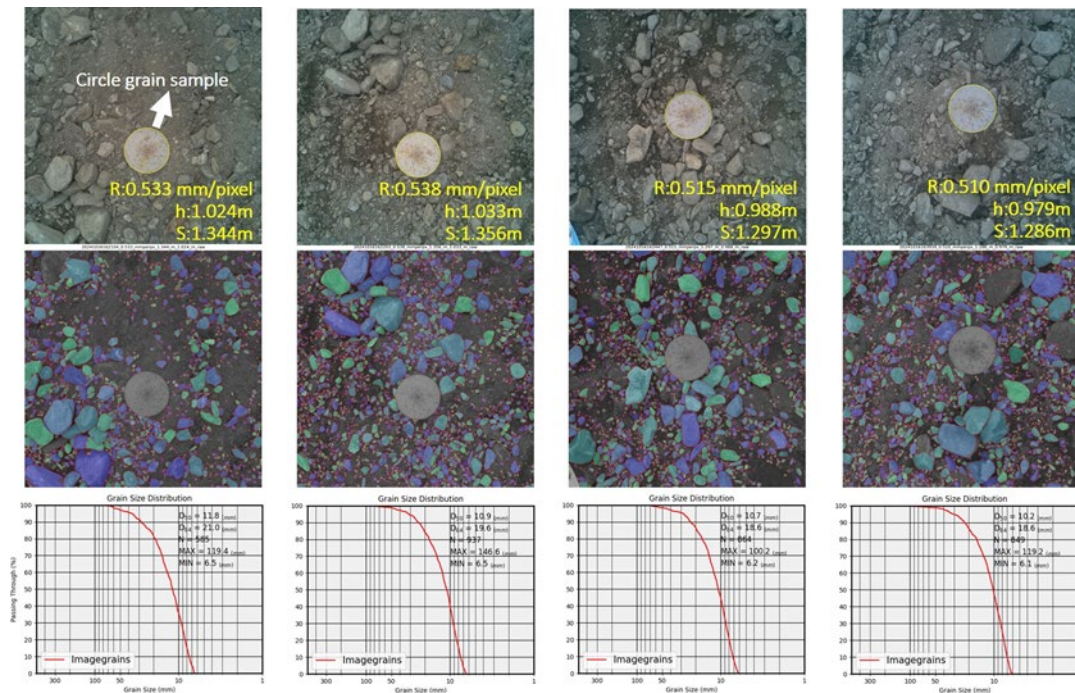


圖 33 試驗前渠道底床粒徑調查成果

本研究利用試驗前後的高程數值模型成果進行渠道河床地形高程變異分析，可以明顯觀察到蜿蜒型試驗渠道在凹岸區域有顯著的沖刷現象，運移之泥砂於渠道下游出水口處因受到攔網的影響，而產生大量土砂堆積現象，另外一處堆積處為上游蓄水區域中(圖 34)。本研究 AI-RPiGS-Scanner 調查點位 IM01 至 IM03 及 IM16 至 IM20 處落在上述的泥砂堆積處，地形高程變化分析成果亦顯示明顯的沖淤變化邊界約落在粒徑調查點位 IM07 左右，其 IM07 上游河道以沖刷為主，IM07 位置之下游渠道河床則以淤積為主，整體而言，在河道凹岸地區先以沖刷作用為主。觀察試驗後的渠道河床粒徑情形後，發現泥砂粒徑整體而言有比試驗前還大，因此在粒徑調查作業時採用較大的標準粒徑樣板(320mm)，圖 35 顯示渠道底床 20 處粒徑調查之影像分析

成果。

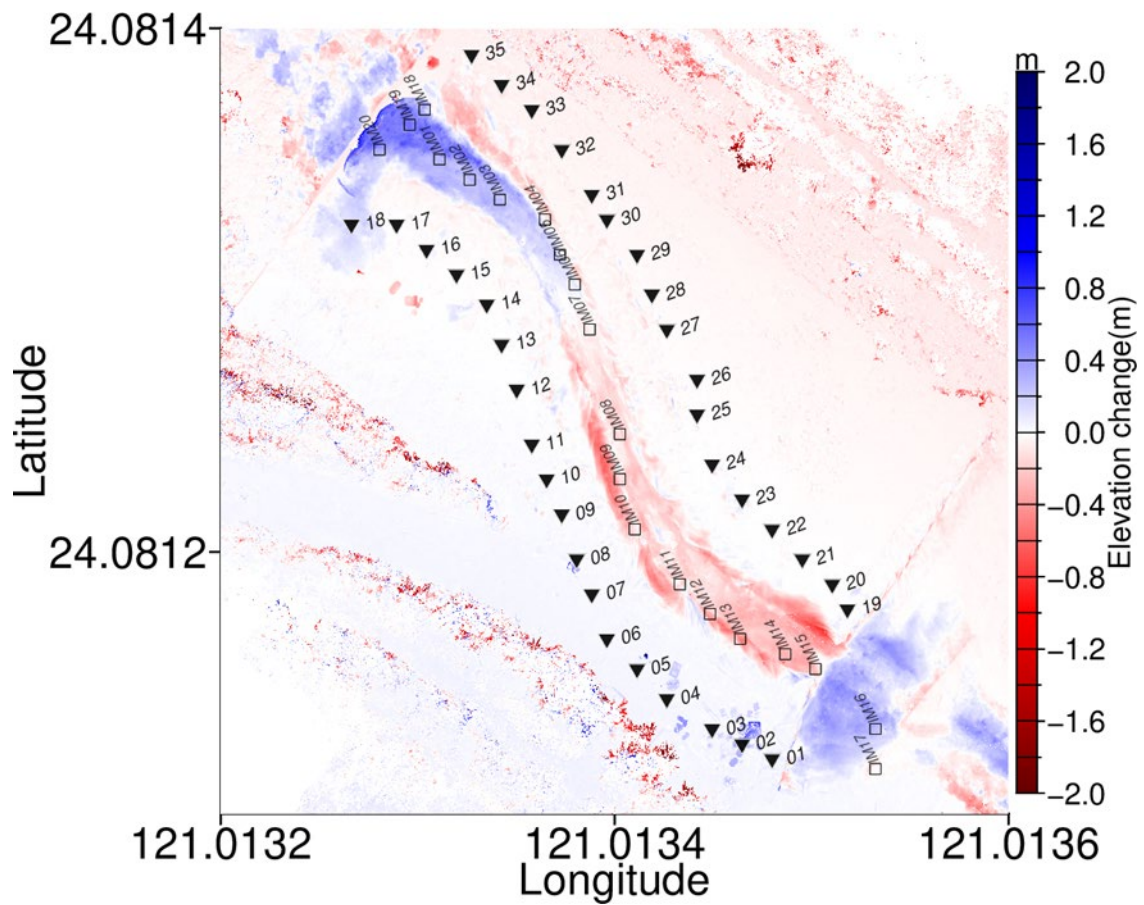


圖 34 試驗前後底床沖淤變化

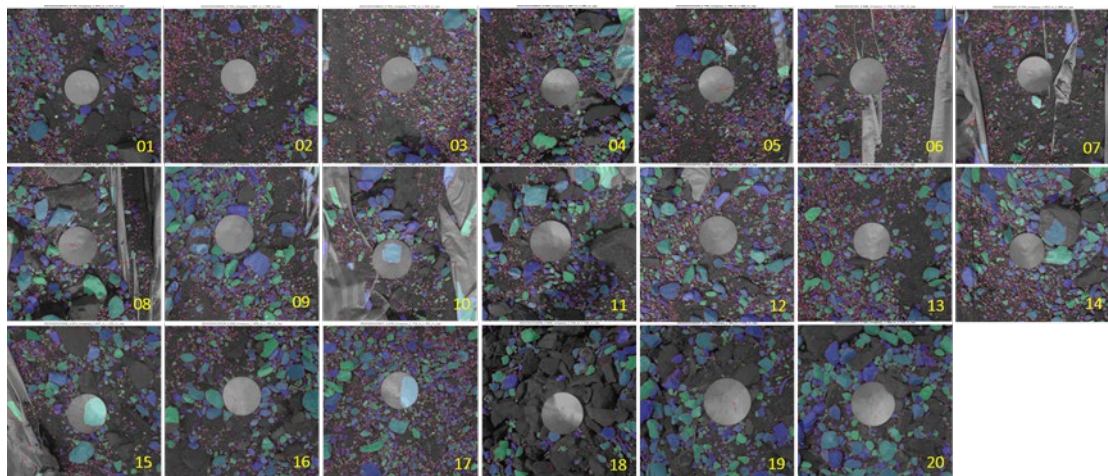


圖 35 試驗後粒徑分析成果

若從實際粒徑分布曲線分析成果來進行討論，亦可以獲得類似的觀察成果。泥砂堆積處之粒徑調查點位 IM01、IM16 及 IM20 之粒徑

曲線成果如圖 36 顯示， D_{50} 分別為 15.6mm(CI95%, [15. 16.4])、16.4mm([15.3 17.8])、21.7mm([19.2 24.5])； D_{84} 分別為 27.9mm(CI95%, [26.7 29.3])、29.7mm([28. 33.3])、46.8mm([41.8 53.7])；凹岸沖刷位置的粒徑調查成果以測點 IM09 的粒徑曲線分析成果為例(圖 37)， D_{50} 為 16.7mm([15.8 17.3])且 D_{84} 為 29.4mm([27.5 32.7])。試驗後的代表粒徑數值皆大於試驗前的分析結果，配合沖淤分析成果，本研究可以推論試驗前落於河床上的 30 公分厚的土砂材料於試驗期間主要受到沖刷侵蝕作用，上游相對較大粒徑的土砂材料運移至渠道並於特定的水文條件之下落淤於試驗渠道中。

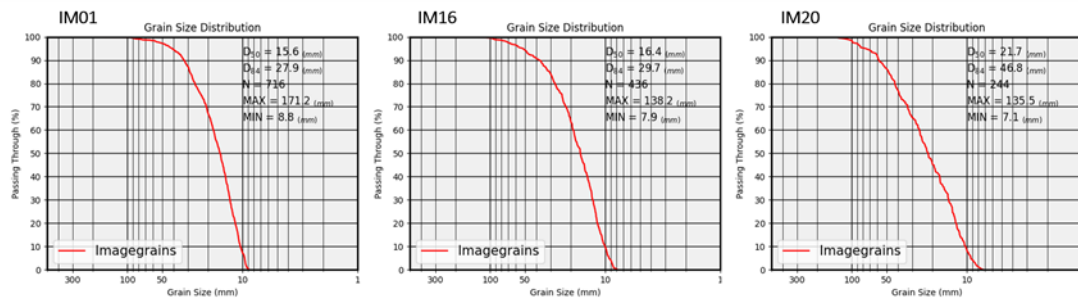


圖 36 IM01、IM16 及 IM20 堆積處之粒徑曲線分析成果

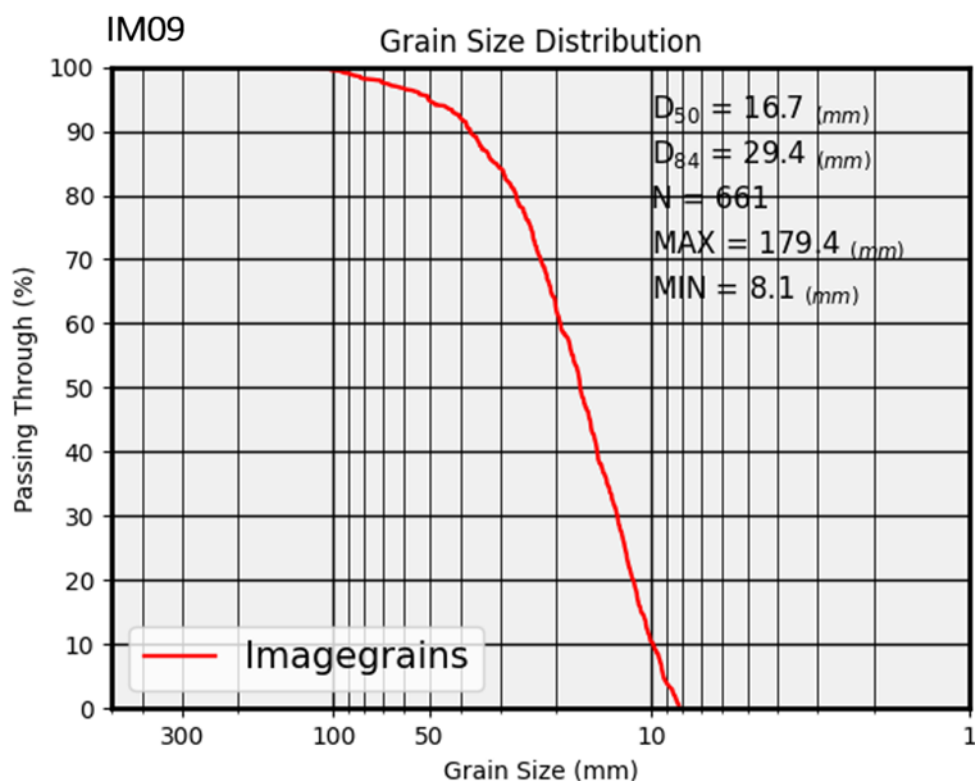


圖 37 IM09 凹岸沖刷處之粒徑曲線分析成果

2. 野外試驗之智能球開發與測試

112 年計畫執行年度，本研究已利用室內水槽試驗來開發與測試智能球之性能，然而，面臨時間解析度不足以及智能顆粒密度低於真實泥砂顆粒條件等挑戰，另外，在野外試驗情境下，亦需要克服野外水下強力的水文環境條件，因此，本年度團隊在設備的穩定性、感測精度、數據存儲和時間同步性等方面做了精密設計，並特別針對設備的外殼進行了模擬製作，使其重量和形狀接近自然泥砂顆粒(目前顆粒直徑為 7 公分、密度為 1.8g/cm^3 ; 如圖 30)，進一步提升了在野外測

量的真實性和數據的代表性。本研究將詳細說明本次實驗中使用的各項設備：

1.Arduino 主機板(ESP32)

ESP32 主機板作為本次實驗的核心控制和數據處理設備，雖然它本身並不具備內建的感測功能，但其多樣化的接口和優異的處理速度使其能夠支持多個高精度感測器的連接與數據傳輸。ESP32 的雙核心處理器能夠在進行複雜計算的同時維持穩定的運行，並內建 WiFi 和藍牙功能，使其具有良好的可擴展性。這些特性使 ESP32 成為數據收集和分析工作的理想選擇，特別是在長時間或高頻數據收集的實驗中。然而，ESP32 本身並無特定的量測精度指標，其主要貢獻在於支援其他高精度感測器的運行和數據處理。

2.九軸感測元件(MPU9250)

加速度計：MPU9250 的加速度計具有多種量測範圍設定，分別為 $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$ 、 $\pm 8g$ 和 $\pm 16g$ ，可以根據不同實驗需求調整適合的範圍。加速度計的量測精度為 $\pm 0.01g$ ，這樣的高靈敏度使其能夠精確捕捉粒子在底床移動過程中的微小加速度變化，對研究粒子的動態行為和受力狀態非常有幫助。陀螺儀：MPU9250 的陀螺儀可以測量範圍內的旋轉速度，範圍選項包括 ± 250 、 ± 500 、 ± 1000 和 $\pm 2000^{\circ}/s$ 。其量測精度為 $\pm 0.05^{\circ}/s$ ，能夠提供粒子在三維空間中的角速度變化，對分析

粒子的旋轉運動、碰撞情況和轉向變化具有重要意義。磁力計：此感測器內建的磁力計可以測量範圍達到 ± 4800 微特斯拉(μT)，量測精度約為 $\pm 0.6 \mu\text{T}$ 。磁力計的數據可用於定位感測器在水中的方位變化，有助於追蹤粒子的空間位置變化和整體運動方向，對粒子運動的軌跡重建提供了可靠的數據支持。

3.SD 記憶卡讀卡機

在實驗過程中，數據收集和即時存儲的穩定性至關重要。由於水下環境中訊號傳輸存在諸多挑戰，本研究選用 SD 記憶卡作為數據存儲設備，以避免因無線傳輸不穩定導致的數據遺失。SD 記憶卡的讀寫速度（Class10 或更高等級，通常可達 10MB/s 以上）確保了高頻數據的連續記錄，即使在長時間測量中也不需要頻繁更換卡片。這樣的設計提升了數據的完整性，使本研究能夠更方便地進行後續的數據批次處理和分析。

4.計時器(DS3231)

DS3231 計時器在本次實驗中用於提供高精度的時間同步，以確保每一筆數據都有準確的時間標記。此計時器的時間精度為 $\pm 2\text{ppm}$ （即每年約 ± 1 分鐘的誤差），具備自動溫度補償功能，使其能夠在溫度範圍 -40°C 到 $+85^{\circ}\text{C}$ 之間保持穩定的時間精度。這種高精度的時間記錄對於後續數據的時間序列分析尤為重要，尤其是在需要毫秒

級別精度的時間對比中，此計時器的精準性和穩定性可以大大提高數據分析的準確性。每一筆數據均帶有 DS3231 記錄的精確時間戳記，這對於不同數據之間的時間對比和同步化操作至關重要。

5.3D 列印設計與原型製作

首先，本研究使用 CAD 軟體設計了感測器的外殼形狀，針對顆粒尺寸進行微調，確保其大小符合我們的實驗需求。完成設計後，使用 3D 列印機打印出外殼原型。3D 列印技術讓我們能夠精確控制外殼的幾何形狀，以便進一步調整重量和尺寸，使其接近自然泥砂的特性。

6.翻模製作

利用 3D 列印出的外殼原型，我們進行翻模製作，使用矽膠進行灌注以製作模具。矽膠模具具有良好的細節還原能力和耐久性，能夠精確複製出 3D 列印原型的外型。這樣的翻模製作方式可以減少 3D 列印的耗時和成本，並在多次製作過程中保持一致的形狀。

7.Eproxy 與泥砂混合物製作

為了達到接近自然泥沙的比重和質量，我們將 Eproxy 樹脂與細小的泥砂顆粒混合，並灌注到矽膠模具中。通過調整 Eproxy 與泥砂的混合比例，我們可以控制最終外殼的密度，使感測器具有與自然泥砂顆粒相似的重量和沉降特性。這樣的混合物確保了感測器不僅在尺

寸上符合要求，也具備足夠的重量，能夠在水流中模擬真實泥砂的運動行為。

8. 外殼固化與加工

混合物灌注至矽膠模具後，等待其完全固化，固化後的 Eproxy 與泥沙混合外殼具有良好的耐水性和抗壓性，適合長時間的水下實驗。最終的外殼經過細緻的打磨和加工，以確保外型的平滑度和符合要求的粒徑尺寸。

以上設計與製作過程使得本研究的智能球感測器在比重和外觀上均接近於自然泥砂顆粒，能夠更真實地模擬其在水流中的運動和碰撞行為，本研究室外渠道試驗使用的智能球設計概念如圖 38 所示。

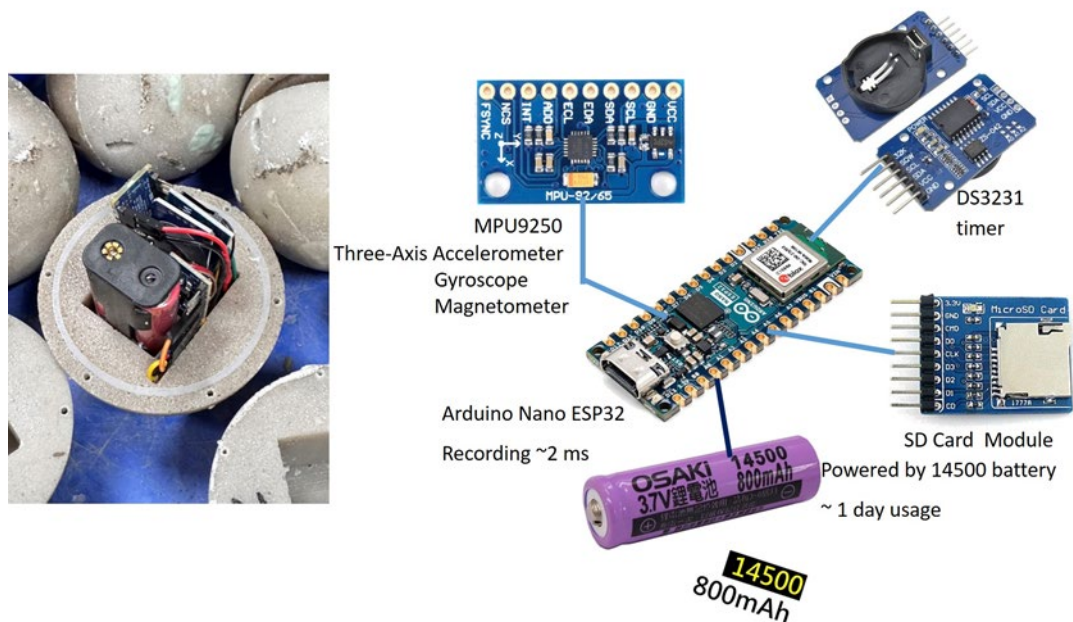


圖 38 野外試驗用之智能球

在本次實驗中，本研究總共準備了 19 顆智能球感測器，並且搭

配近 100 顆的模擬顆粒，為了確保實驗後能順利回收所有置入的感測器，本研究在下游設置了攔砂網，這道攔截設施能有效攔住從上游流動而來的智能球感測器，避免其流出渠道外，最終在總共置入的 19 個感測器中成功回收了 15 個，達成了近 79% 的回收率，回收成果相當豐碩。在此本研究以臨近智能球投擲位置之測站 CL20 及智能顆粒編號#15 之數據資料來進行監測成果說明(圖 39)，本試驗期間，智能球投擲進入試驗渠道的時間為 10:32:12 秒，該時間接近上游蓄水區水位峰值開始洩降之時刻(10:32:00 秒)，其代表試驗渠道中之流量有增大現象，微地動測站 CL20 的時頻分析訊號成果亦顯示頻率範圍介於 20Hz 至 50Hz 的 PSD 能量於該時刻亦有增強趨勢。智能球編號 15 的加速度數據之三軸平方和開根號之加速度值如圖 39 所示，最大加速度值為 $2.44g(1g=9.81m/s^2)$ ，顆粒總躍移時間約為 20 秒(如圖 39 之灰色垂直虛線區間)，該時間內發生撞擊次數為 8 次，顆粒主要運移的渠道長度約為 30m，平均顆粒的躍移速度約為 1.5m/s。

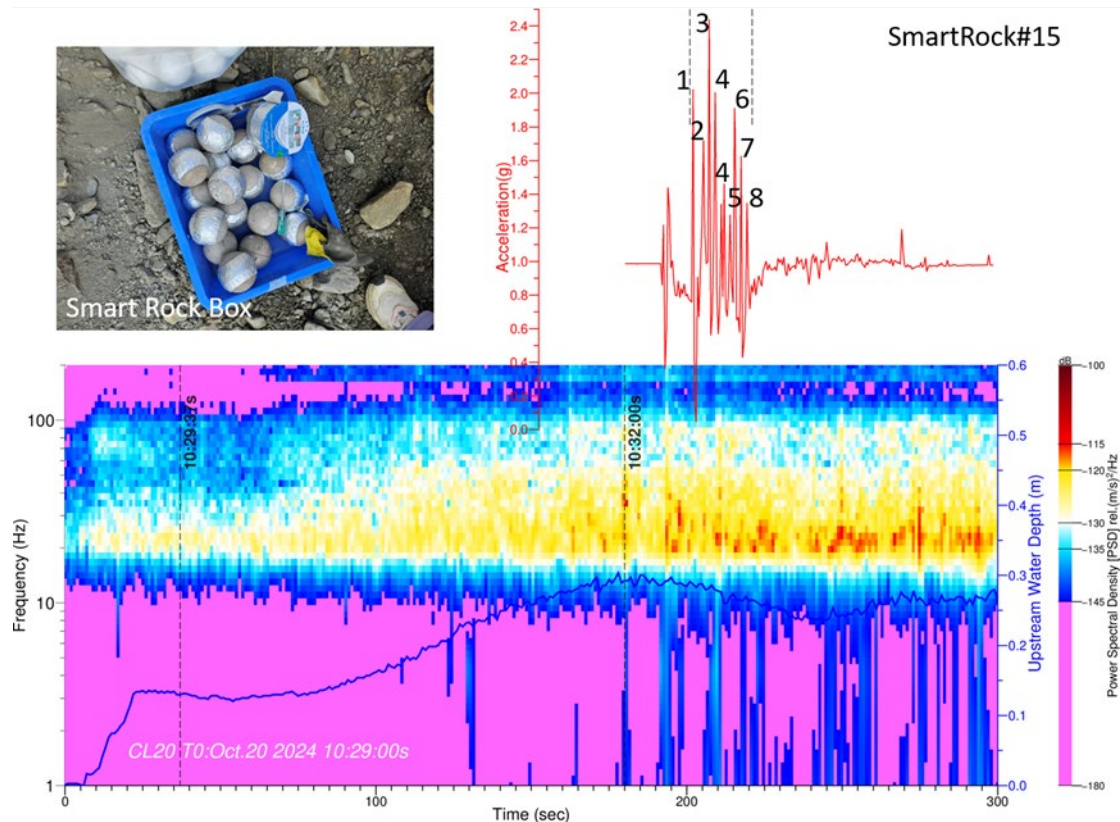


圖 39 上游蓄水區水位(藍色)、智能球加速度時序(紅色)及時頻圖

3. 近河岸微地動訊號分析

本研究利用上游蓄水區水位、河床位置與河岸之溫差時序資料、渠道左右岸微地動訊號之時頻與沖淤變異成果進行系統性的關聯性分析，並提出相關泥砂沖刷及堆積作用之時頻特徵成果。首先，本研究選用凹岸沖刷作用為主的測站 CL09 之微地動訊號進行時頻分析，可以觀察到當蓄水區之水位溢淹至試驗渠道時間點(時:分:秒，10:29:37)之後，於頻率 20Hz 以上有顯著的功譜密度強度(PSD)，並於蓄水區四個水位峰值出現時間(10:32:37、10:35:40、10:41:30 及

10:45:50; 其亦可代表試驗渠道水位開始抬升時間)後皆可觀察到較強的 PSD 值集中於頻率範圍 20Hz 至 80Hz 之間(圖 40 中深紅色的部分)，高於 100Hz 以上的 PSD 能量僅出現於試驗時間的前段(早於 10:36)，本研究推測相對高頻的 PSD 能量主要的貢獻來源為河床質運移作用，受到渠道本身及上游泥砂有限供應源的限制，僅能於試驗前期且於特定水力條件之下觀察到河床載作用。本研究進一步利用相同渠道斷面位置之測站 CL24，其位於渠道的右岸屬於無顯著沖刷作用之測站，時頻分析成果顯示測站 CL24 整體 PSD 能量的強度及頻率分布範圍相較於測站 CL09，強度減弱且頻率往低頻方向移動，因此，本研究推測當觀察到相對較強的 PSD 能量且頻率分布範圍較廣則可代表該測站位置主要受到沖刷侵蝕作用。

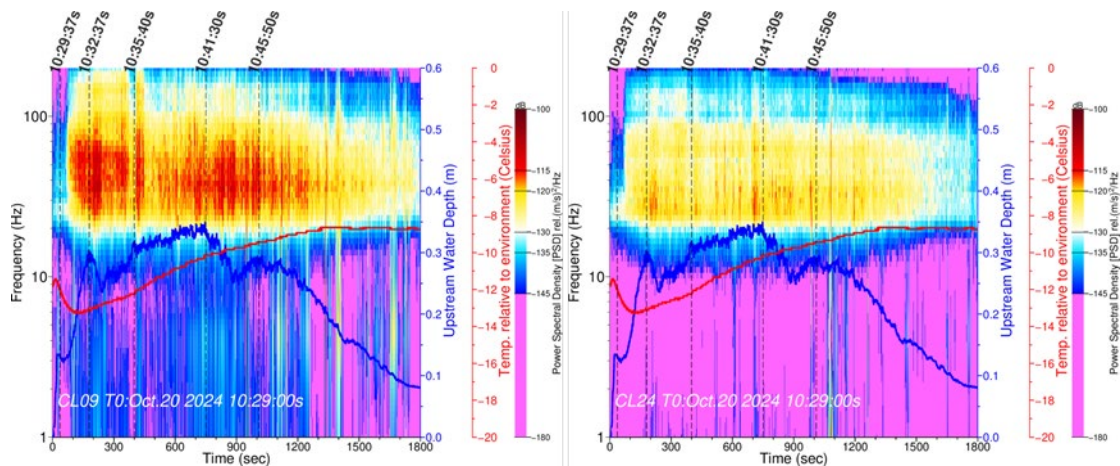


圖 40 上游蓄水區水位(藍色)、溫度差異(紅色)及時頻圖

由河床高程變異分析成果中(圖 34)，相同渠道斷面之右岸測站 CL34 有顯著的凹岸沖刷作用，其左岸測站 CL17 並無顯著的沖刷侵

蝕，本研究針對測站 CL17 及 CL34 進行時頻分析(圖 41)，結果亦顯示於凹岸沖刷侵蝕之測站 CL34 的 PSD 強度明顯大於測站 CL17，且於 10:36 時間點之前可以觀察到高於 100Hz 的 PSD 能量分布，然而，測站 CL17 的 PSD 能量則相對集中於低頻位置，頻率範圍落在 20Hz 至 40Hz 之間。

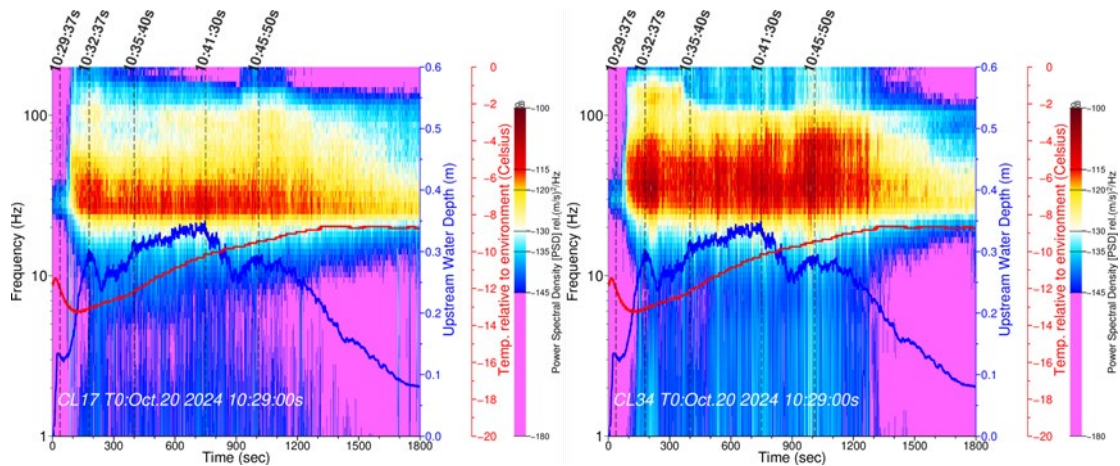


圖 41 上游蓄水區水位(藍色)、溫度差異(紅色)及時頻圖

4. 河道光纖紀錄之初探(Fluvial DAS)

本計畫試驗區域之 DAS 纜線之空間分佈如圖 30 所示。圖 42 顯示為 iDAS 機器記錄的相位變化之時序紀錄，水平軸為頻道數量，由於輸出資料的空間解析度設定為 1 公尺，因此頻道數量亦可以當作空間長度，長度單位為公尺；垂直軸為時間，單位為秒，共計 30 秒資料長度，儀器設定取樣率為 1,000Hz。光纖總長度約為 150 公尺，由於光纖在上游固床工的起始位置有進行熔接，因此可記錄由光纖主機

出發至上游熔接點之 150 公尺，與由熔接點折返至主機位置之 150 公尺，有效光纖資料長度約為 300 公尺，由圖 42 可觀察到頻道數 200 以前的資料是 iDAS 內部光纖的資料，並非為實驗渠道的數據，且於 200 多頻道數以後，光纖資料呈現對稱性。

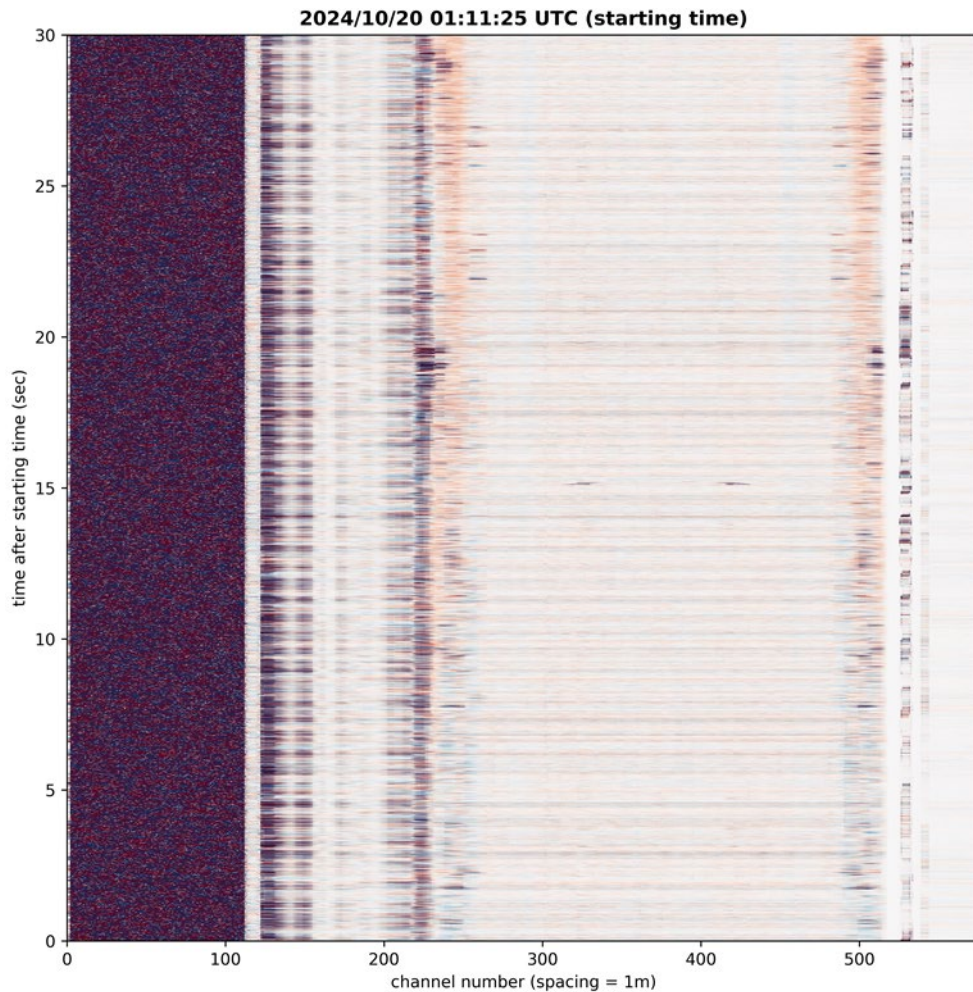


圖 42 試驗前之光纖紀錄

由攝影畫面可得知上游水流約在 10:26:50 秒抵達固床工光纖熔接位置，檢查光纖於該時段之 30 秒時序紀錄，可以清楚觀察到在頻道數 370 至 380 之間可以看到顯著的相位變化(phase change, $\Delta \varphi$; 圖 43)，可以將相位變化乘以 11.6×10^{-9} 常數，最終再乘以取樣率 1,000Hz，

將相位變化轉換成應變率(strain rate, ε)。目前本研究作圖所使用的調色盤色調範圍設定為-600 及 600 之相位變化,對應的應變率為 $\pm 1.16 \times 10^{-5}$,其代表上游水源水量通過可造成的應變率變化。

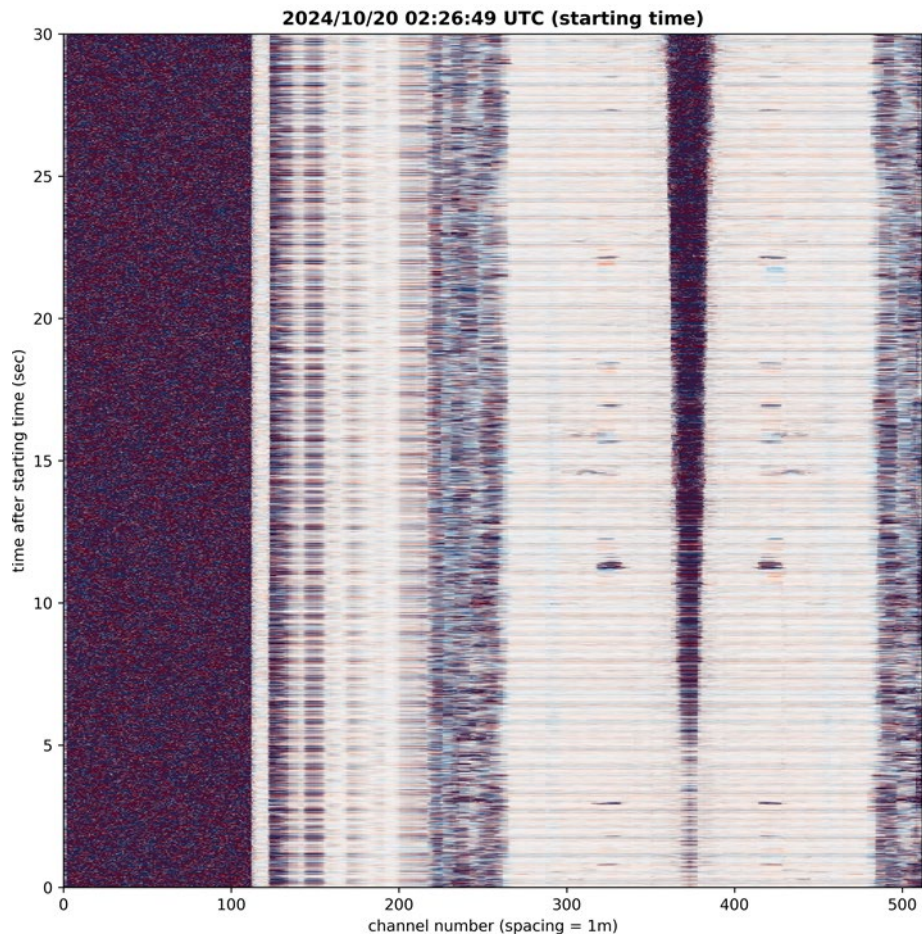


圖 43 上游水源抵達熔接點處之光纖紀錄

5. 試驗渠道敲擊試驗成果

為了釐清泥砂顆粒撞擊河床時可能產生的微地動訊號之主頻範圍及震波能量隨著傳遞距離越遠之衰減情形,本研究於渠道底床進行了 20 次的敲擊試驗,如圖 30 編號 IM01 至 IM20,進行時頻分析之

測站編號為 CL05、CL36 至 CL48，離河心最遠之測站 CL48，其與河心之水平距離約為 30 公尺。圖 44 顯示 IM11 敲擊案例之成果，距離河心最近之測站 CL05 其 PSD 能量強度最大，且頻率範圍介於 20Hz 至 100Hz 之間，隨著波傳路徑長度增加，則測站記錄之 PSD 能量逐漸減小，但是，在測站 CL43 以後的測站，其距離敲擊位置較遠，但是卻有比測站 CL43 的 PSD 能量還大，本研究推論測站 CL44 至 CL45 地底下可能有一定厚度的沖積層，導致特殊頻段之地動訊號會有震幅放大效應之影響，上述現象亦可以在 IM08 敲擊案例之分析成果中所觀察到，但是由於 IM08 相較於 IM11 與測試分析陣列距離較遠，因此整體的 PSD 能量強度較小(圖 45)。整體而言，敲擊試驗中所觀察到的頻率範圍分佈及 PSD 強度皆可以呼應試驗期間觀察到的 PSD 主頻分佈，其可能與河床質運移作用有關。

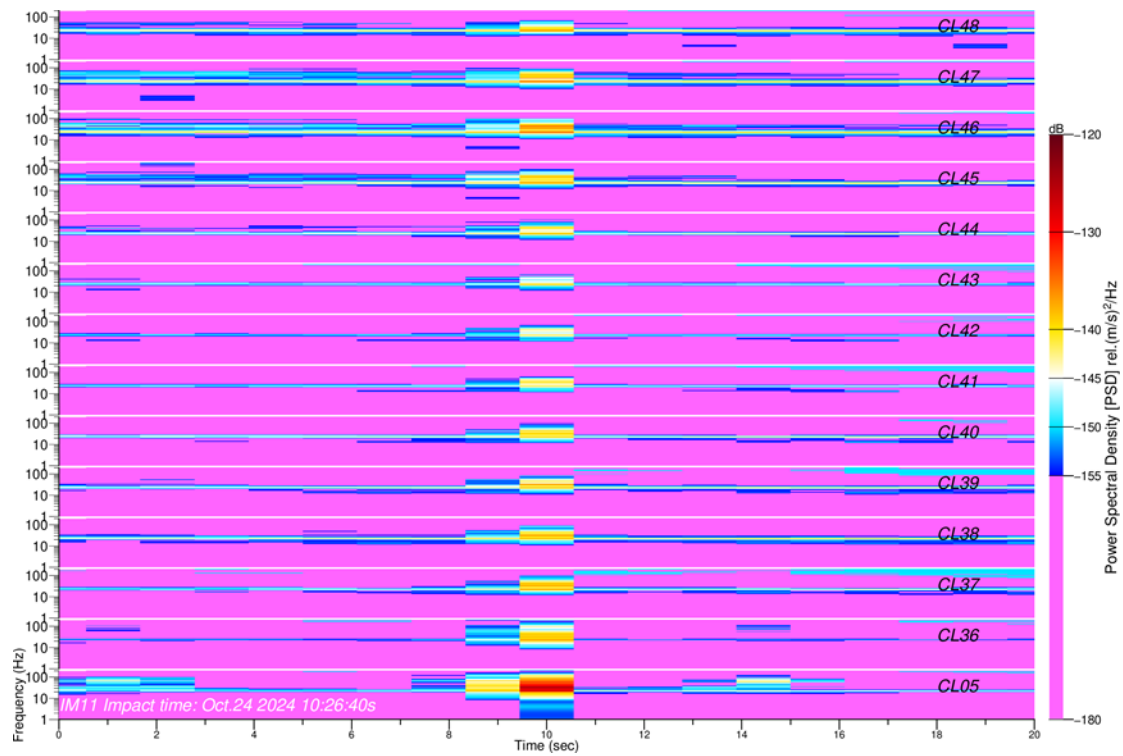


圖 44 IM11 敲擊試驗之時頻圖成果

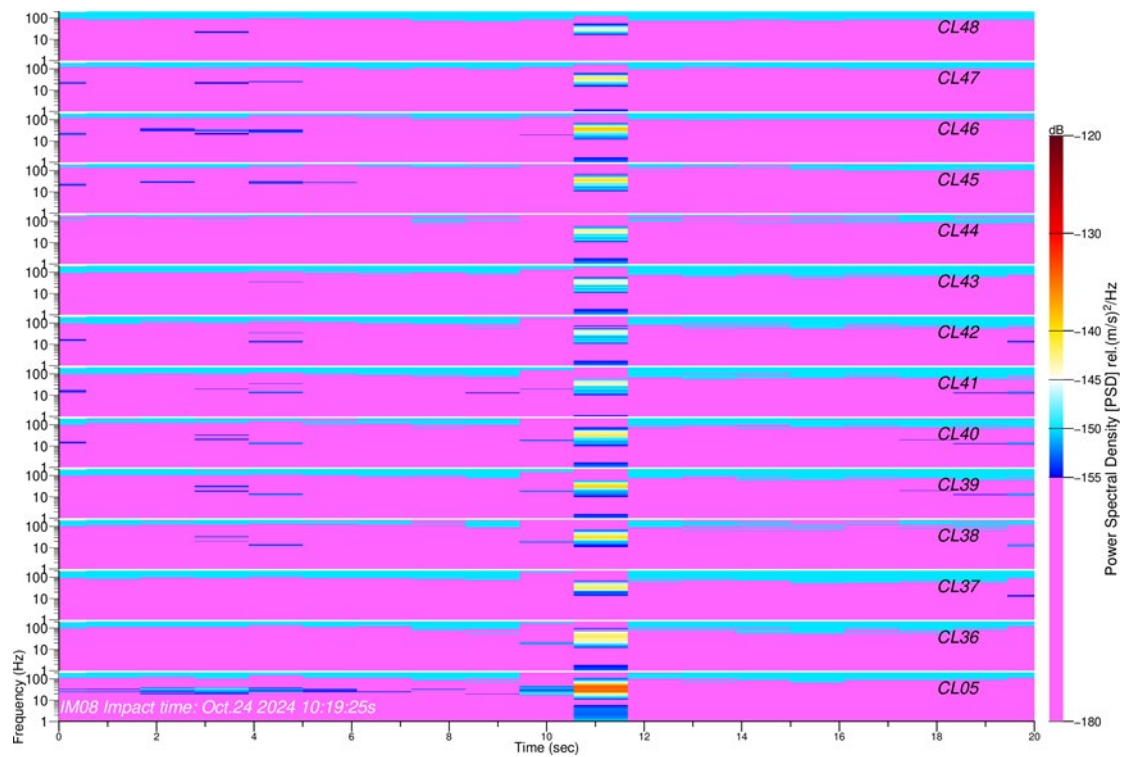


圖 45 IM08 敲擊試驗之時頻圖成果

第四章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

月份		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
工作項目													
分析室內渠槽試驗成果													
主被動表面波震測法於現地河床施作測試													
感測器測試與分析方法建立含水聲計													
DAS及粒徑掃描儀													
野外渠槽試驗規劃與施作													
震波式推移質跳躍模型率定含微地動儀與DAS安裝													
現地渠槽試驗河床質粒徑調查													
現地渠槽試驗區域正射影像製作													
泥砂觀測													
試驗整備													
試驗結果彙整													
報告書	工作執行計畫書												
	期中報告書												
	期末報告書												
	成果報告及會計報告												
預定進度累積百分比(%)		0	13	25	35	45	56	68	80	93	95	97	100

圖 46 計畫甘特圖

第一節 計畫交付項目

(1)透過持續進行渠槽試驗之經驗，規劃大型野外試驗場之泥砂粒徑、流量、河寬尺寸、坡度、(2)進行河道整理,控制河道寬度、河床坡度及底床泥砂粒徑分布、(3)試驗前後河床高程地形模型建置及底床泥砂粒徑調查、(4)主被動表面波震測法於現地試驗河床施作測試、(5) 利用 USFS 現地試驗方式，來了解實驗時推移載的時序量體變化、(6) 設計人工注水及可控制泥砂料源置入裝置，並針對置入泥砂料源進行粒徑控制、(7) 設計不同尺寸及比重之智能顆粒及混合天然泥砂

顆粒來進行試驗、(8) 利用地表微地動陣列及底床中光纖 DAS 來紀錄試驗期間的微地動訊號、(9) 利用自行開發之水聲計紀錄環境水聲訊號來釐清可以的水環境震動來源、(10) 安裝水壓計及攝影機以了解試驗當下的水文歷時與表面流速變化。

期中階段

- 試驗規劃與整備
- 完成儀器配置，詳見表 1 彙整試驗相關監測、調查與工程施作設備
- 持續完成室內渠槽試驗的分析成果
- 完成現地河床主被動表面波震測法施作與資料蒐集
- 完成光纖 DAS 資料分析流程建立
- 完成測試與開發新式深度圖像與深度學習模型之粒徑掃描法(AI-RPiGS-Scanner)
- 加強水聲計硬體於野外施作的可行性

期末階段

- 完成野外渠槽試驗(於 10 月 20 日進行)並彙整相關試驗結果
- 完成主動式震源試驗與被動式表面波震測求得震波物理模型所需的輸入參數調查($C_3 \sim C_5$ 係數) (如圖 30 之 20 處河床敲擊試驗)

- 完成試驗前後 AI-RPiGS-Scanner 之渠道底床表面粒徑調查
- 完成野外試驗智能球設備更新、測試與應用
- 探究河床沖淤作用變化對於河道兩岸之微地動訊號生成之影響，並討論其相對於凹岸侵蝕作用之關聯性
- 分散式光纖感測器應用於河川水砂作用之初探

表 2 計畫重要檢核點管制表

檢核點	預計日期	交付項目	數量
1	7 月 17 日(三)	期中報告書	5 份
2	11 月 13 日(三)	期末報告書	5 份
3	12 月 31 日(二)	成果報告書	5 份

資料來源：本計畫

第五章 結論及建議

第一節 結論

本計畫重要創新工作為利用近河道微地動訊號及震波物理模型來量測全洪程推移載時序過程，為現代化河川泥砂觀測技術新增一片藍圖。透過現地可控制的試驗渠道，以人工砂料、六軸感測之礫石粒子追蹤器、USFS 河床質採樣器及堰堤蓄水控制流量，透過試驗成果來驗證震波物理模型之可行性，並發展及改良河川震波物理模型之可應用評估程序，以推廣技術在其他河川的應用價值。

透過本計畫於期中階段完成之工項針對室內渠槽試驗分析成果可歸納單一智能球的跳躍撞擊行為，於斷面 5 位置的水聲計相較於斷面 3 至斷面 4 之間的微地動儀更容易偵測到其產生的訊號；而在多顆粒智能球的試驗中可以觀察到而外的高頻範圍(80~90)的 PSD 能量值，其可能為智能球相互碰撞的行為所產生。然而，在智能球的滾動行為試驗，本研究可以觀察到智能球的加速度時序資料有更頻繁地撞擊渠槽底床的現象。關於光纖資料與分析流程建立部分，本計畫優先透過地震事件的光纖資料來進行測試，目前已完成相關分析方法的流程建立。關於六軸感測之礫石粒子追蹤器(智能球)正在針對野外渠槽試驗條件來進行動態修正，以達到施作防水及保護內部模組之功能，目前硬體上比較大的極限是資料的取樣間距問題，目前僅能控制在

0.00667 秒。關於快速且穩定的河床質粒徑調查方法，本年度也進行新的嘗試並完成分析程序的開發，主要的創新為使用 RGBD 深度相機圖像資料配合深度學習模型來進行粒徑分析研究。

在期末階段於 10 月 20 日完成惠蓀二號橋之蘭島溪河道野外渠道試驗，並於試驗中成功測試高空間解析度之 DAS 感測器、新型便攜式微地動感測器(SmartSolo)、機器學習式現地型手持式粒徑掃描儀(AI-RPiGS-Scanner)、泥砂顆粒智能球(smart rock)等設備，並以特性分析資料特徵為主，提出河川水砂沖蝕作用可能造成的微地動訊號主頻範圍及 PSD 強度變化。在 DAS 紀錄初探成果發現入流水源抵達初期，iDAS 主機可以記錄到約 $\pm 1.16 \times 10^{-5}$ ，其證實 DAS 對於水砂作用的高敏感度可以應用於未來的河川水砂監測之相關應用。本研究自行開發的 AI-RPiGS-Scanner 可以在野外 30 分鐘內即時取得 30 平方公尺範圍內(試驗渠道)的河床表面粒徑分佈特徵及相關代表粒徑數值；自製之智能球紀錄顯示在渠道試驗期間(水深小於 0.8m、可能流量至少大於 1cms 條件下、表面流速約為 2.7m/s)可進行約 8 次的跳躍撞擊，估計其平均躍移速度為 1.5m/s。

第二節 建議

本年度野外試驗為第一次在惠蓀二號橋蘭島溪進行，由於尚未完成率定能高大圳水源供應流量與水門開口大小之關係，因此，本次實

驗直接將水門全開導致試驗渠道中的流量有過大的趨勢(至少大於 1 cms),導致渠道底床原先的 30 公分土砂層直接受到嚴重的沖刷侵蝕,未來可考慮透過多次的放水來率定上游供應源的流量大小,以達到可控制流量之試驗之目的。上述提及之嚴重沖刷作用亦導致 DAS 纜線在試驗中後段期間,已呈現漂浮在水體中的狀態,未來也需要考慮如何讓 DAS 纜線可以完全的固定在底床材料。

本次野外試驗為防止入流水源由渠道底床及側壁入滲至地下,因此使用防水布將渠道周遭邊界覆蓋,未來若水量為準確可控制,將可以不使用防水布,且可以使用較大粒徑之泥砂進行底床護甲。

本計畫執行兩年期間,在室內渠槽試驗有相對完整的定性與定量分析成果,本年度期中階段花費相對較多的時間進行野外渠道整理工程與相關監測及調查設備之開發率定之工作,後續又受到兩起颱風事件影響,導致接近期末階段 10 月 20 日才順利完成野外渠道試驗,後續將持續擬提「利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型(3)」第三期計畫申請書,預計完成第二期時序資料與調查成果的定量分析。期望最終得以有效提升震波式推移載分析技術在河川推移載量測上的應用價值。

參考文獻

1. Aki, K., & Richards, P. G. (2002) Quantitative Seismology, 2nd ed., 700 pp., Univ. Sci., Sausalito, Calif.
2. Auel, C., Albayrak, I., Sumi, T., & Boes, R. M. (2017) Sediment transport in high-speed flows over a fixed bed: 1. Particle dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(9), 1365-1383. <https://doi.org/10.1002/esp.4128>.
3. Bunte, K., Abt, S.R., Potyondy, J.P., & Ryan, S.E. (2004) Measurement of Coarse Gravel and Cobble Transport Using Portable Bedload Traps, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9):879-893.
4. Bakker, M., Gimbert, F., Geay, T., Misset, C., Zanker, S., & Recking, A. (2020). Field application and validation of a seismic bedload transport model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(5), e2019JF005416.
5. Berbellini, A., M. Schimmel, A. M.G. Ferreira, and A. Morelli (2018) Constraining S-wave velocity using Rayleigh wave ellipticity from polarization analysis of seismic noise, *Geophysical Journal International*, 216(3), 1817 – 1830, doi:10.1093/gji/ggy512.
6. Burtin, A., Bollinger, L., Vergne, J., Cattin, R., & Nábělek, J. (2008). Spectral analysis of seismic noise induced by rivers: A new tool to monitor spatiotemporal changes in stream hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113, B05301.
7. Chao, W.A., Wu, Y.M., Zhao, L. Tsai, V.C. & Chen, C.H. (2015) Seismologically determined bedload flux during the typhoon season,

Scientific Reports, 5, 8261.

8. Delft Hydraulics (1996) “Test and calibration measurements with an adapted Helley-Smith for bedload transport measurements in sand-bed rivers,” Rep. Q2141, Delft Hydraulics, Delft, the Netherlands (in Dutch).
9. Dittrich, W. E. (1982) Settling velocity of natural particles, Water Resour. Res., 18, 1615 – 1626.
10. Fernandez Luque, F. R., & van Beek, R. (1976) Erosion and transport of bed-load sediment, J. Hydraul. Res., 14, 127-144.
11. Gimbert, F., Tsai, V. C., & Lamb, M. P. (2014). A physical model for seismic noise generation by turbulent flow in rivers. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 119(10), 2209 – 2238.
12. Gimbert, F., Fuller, B. M., Lamb, M. P., Tsai, V. C., & Johnson, J. P. L. (2019). Particle transport mechanics and induced seismic noise in steep flume experiments with accelerometer-embedded tracers. Earth Surface Processes and Landforms, 44(1), 219 – 241.
13. Herrmann, R. B. (2013) Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. Seismological Research Letters, 84(6), 1081-1088. <https://doi.org/10.1785/0220110096>.
14. Hung, C. Y., Chen, P. Y., Tfwala, S. S., Liang, M. C., Jiang, C. H. & Chen, S. C. (2022). Synchronized measurements of geometry and flow in field-scale dam breach experiments (under review).
15. Kamphuis, J. W. (1974) Determination of sand roughness for fixed beds, J. Hydraul. Res., 12, 193-203.

16. Lagarde, S., Dietze, M., Gimbert, F., Laronne, J. B., Turowski, J. M., & Halfi, E. (2021) Grain-Size Distribution and Propagation Effects on Seismic Signals Generated by Bedload Transport, *Water Resources Research*, 57, e2020WR028700.
17. Lamb, M. P., Dietrich, W. E., & Sklar, L. S. (2008) A model for fluvial bedrock incision by impacting suspended and bed load sediment, *J. Geophys. Res.*, 113, F03025, doi:10.1029/2007JF000915.
18. Lajeunesse, E., Malverti, L., & Charru, F. (2010) Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: Experiments and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 115, F04001. <https://doi.org/10.1029/2009jf001628>.
19. Mair, D., G. Witz, A. H. D. Prado and P. Garefalakis (2023) Automated detecting, segmenting and measuring of grains in images of fluvial sediments: The potential for large and precise data from specialist deep learning models and transfer learning, *Earth Surface Processes and Landforms*.
20. Olafsdottir, E. A., Erlingsson, S., & Bessason, B. (2018). Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils, *Can. Geotech. J.* 55: 217-233, [dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0302](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0302).
21. Parker, G. (1990) Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *J. Hydraul. Res.*, 28, 417-436.
22. Parker, G. (1991) Selective sorting and abrasion of river gravel. ii: Applications, *J. Hydraul. Eng.*, 117, 150-151.
23. Purinton, B. and Bookhagen, B. (2019) Introducing PebbleCounts: a grain-sizing tool for photo surveys of dynamic gravel-bed rivers, *Earth*

Surface Dynamics, 7, 859 – 877.

24. Sambridge, M. (1999) Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-I: Searching a parameter space, *Geophysical Journal International*, 138(2), 479 – 494.
25. Schimmel, M., E. Stutzmann, F. Ardhuin, and J. Gallart (2011) Polarized Earth' s ambient microseismic noise, *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, 12(7), 1 – 14, doi:10.1029/2011GC003661.
26. Sklar, L. S., & Dietrich, W. E. (2004) A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, doi:10.1029/2003WR002496.
27. Tsai, V. C., Minchew, B., Lamb, M. P., & Ampuero, J.-P. (2012). A physical model for seismic noise generation from sediment transport in rivers. *Geophysical Research Letters*, 39(2), L20404.
28. Tsorng, S. J., Capart, H., Lai, J. S. & Young, D. L. (2006). Three-dimensional tracking of the long time trajectories of suspended particles in a lid-driven cavity flow, *Experiments in Fluids*, 40(2), 314-328.
29. Zhu, W., E. Biondi, J. Li, J. Y., Z. E. Ross, and Z. Zhan (2023). Seismic arrival-time picking on distributed acoustic sensing data using semi-supervised learning, *nature communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43355-3>.
30. 楊曜臣(2021)。利用樹莓派建立低成本、易攜帶的表面粒徑掃描器及其應用。國立陽明交通大學，新竹市

31. 經濟部水利署(2023)。中央管河川自動化土砂量測技術之發展應用(2/2) 工作成果報告書。國立交通大學防災與水環境研究中心，
新竹市

附錄、期末報告審查意見及意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
期末報告審查意見：		
一	野外試驗的驗證需要長時間及不同事件規模來率定相關參數(泥砂粒徑、震波格林函數計算參數)以降低推移載之不確定，目前震波式推移質跳躍模型的準確性為何?在使用所對應的事件規模大小為何?	計畫執行期間的野外槽渠試驗主要透過 AI-RPiGS 粒徑掃描儀調查試驗前後的泥砂粒徑、利用震波敲擊試驗計算震波格林函數、並以六軸智能球記錄顆粒運動及動力參數，上述參數皆是震波式躍移模型分析所需的參數。關於用於模型驗證的泥砂運移量體目前試驗僅能提供事件前後的靜態泥砂沖淤變化量、以及利用河道光纖應變率量測推估沖刷深度及沖刷開始的時間。因此，目前試驗僅能進行定性的模型可行性驗證，計畫申請書第三期若獲得補助，將持續設

項次	審查意見	回覆辦理情形
		計履帶式供砂設備，以利於後續進行模型準確性評估。震波躍移模型係基於河岸微地動訊號紀錄進行分析研究，其可以觀測到的推移載通量大小僅受於微地動儀器最小可記錄的地動速度值及有效紀錄頻率範圍有關。目前，於過去的有效觀測成果中，最小可觀測的推移載通量 (bedload flux)至少為 $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$。
二	對於不同溪流土砂顆粒可能有不同特性，本研究在降低推移載量測的不確定性和提升精準度上，是否有考量於不同河流進行試驗？	不同河川的地文、水文及泥砂特性將有所差異，因此，當應用震波躍移模型於野外河川進行底床載監測，若能事前進行地文、水文及泥砂參數相關調查，即可以獲得可靠的推移載通量資訊。本計畫將先優先

項次	審查意見	回覆辦理情形
		聚焦於可控制的野外槽渠(惠蓀林場蘭島溪)進行多次不同水文及泥砂供應條件下進行試驗，用以歸納震波躍移模型之適用性歸納，未來可以在不同的河川流域中應用，可作為模型可行性驗證案例，再進行詳述的討論。
三	試驗中，寶貝球是否可模擬不同粒徑混和撞擊效果。	目前智能落石設計考量的是泥砂顆粒密度需近似於自然泥砂顆粒，直徑約為 7 公分，再內部填充樹脂(Eproxy)與細小泥砂顆粒於矽膠模具中，以確保俱備足夠的重量，能夠在水流中模擬真實泥砂的運動行為。因次，在設計上係可以設計不同粒徑顆粒進行翻模製作，調整填充物的重

項次	審查意見	回覆辦理情形
		量直到密度與自然泥砂顆粒相近。
四	今年可完成放到其他地方也可以通用的模式?	目前規劃將聚焦於蘭島溪野外可控制之槽渠試驗場址，反覆控制不同的泥砂粒徑與入流條件，進行震波躍移模型驗證。
五	除了蘭島溪外,是否還需再另一個實驗場址實驗才能獲得較確定的物理模型?如不需，其原因為何?如需，場址條件與蘭島溪有何異同?	震波躍移物理模型所需參數主要仰賴相關泥砂粒徑、震波格林函數及泥砂顆粒運動與動力等參數，在場址應用時則可以計算出可信的推移載資訊。本計畫旨在發展上述關鍵參數的調查技術，並利用野外試驗來進行驗證。未來有機會將會嘗試多處不同的河川條件進行相關野外試驗規劃。本計畫執行試驗之蘭島溪場址

項次	審查意見	回覆辦理情形
		具有可控制水源及河道工程整地之便利性，經團隊盤點現有河川流域，鮮少俱有上述條件，在執行野外試驗面臨的困難較多。詳見意見項次一與項次二之答覆內容。

附錄、期中書面審查意見及意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
期中書面審查意見：		
一	本研究計畫研究課題相當具有科學性也很深入，頗具挑戰性。工作項目眾多，要完成需要相當多的精力。工作項目包括室內和床載渠槽試驗，分散式光纖感測器量測河床載震動速度，主動與被動表面波方法率定參數、粒徑影像方法，自記式水聲計等。這些項目都不簡單，特別在應用上，可見研究團隊頗具企圖心。	感謝委員的肯定。
二	目前初步期中的完成項目已有所呈現。不過可能是因為項目與內容項目太多，與分析需要深入細節的關係，目前所呈現的結果略少。但是以期中報	目前計畫於期末階段已順利完成室外渠道試驗，並成功測試高空間解析度之 DAS 感測器、新型便攜式微地動感測器 (SmartSolo)、機器學習式現地

項次	審查意見	回覆辦理情形
	告的範圍而言，認為已經可以通過。報告中也說明了研究困難的要點，將在期末報告以前逐步解決。但是細節的科學性分析，有待期末報告再補齊。	型手持式粒徑掃描儀 (AI-RPiGS-Scanner)、泥砂顆粒智能球 (smart rock) 等設備，並以特性分析資料特徵為主，提出河川水砂沖蝕作用可能造成的微地動訊號主頻範圍及 PSD 強度變化。請詳見期末報告書「第三章 工作執行成果」。
三	摘要與第 2-22 頁，”Sield stress”應該是“Yield stress”之筆誤。如果不是，那就需要加以說明。	感謝委員指正。已修正為「Shields stress」。
四	請註明圖 13 室內渠槽試驗設備是在哪一個場址。	室內渠槽試驗地點為國立成功大學水工試驗所。感謝委員建議，已新增補充說明試驗場址位置。
五	第 2-31 頁，確認試驗使用高達	感謝委員的提醒，在室內試驗

項次	審查意見	回覆辦理情形
	42台之抽水機？那這些抽水機所產生的震動不就會強烈干擾地震儀或分散式光纖震動的量測了嗎。	就已發現幫浦噪訊會嚴重影響微地動訊號分析。然而，本年度執行的野外渠道試驗中，已改直接採用上游能高大圳作為試驗水源，關於原報告書中提及的抽水機方案已刪除。
六	圖18、19，時頻圖內跳躍(saltation)的衝擊如何辨識的，請說明。	圖中的 Saltation 作用是配合試驗期間的攝影畫面，確認泥砂智能顆粒通過微地動儀器及地聲計的時間，並以時頻訊號特徵進行二次檢核，檢核的方式為查看該時間點是否有觀察到較強能量的 PSD 值。
七	第3-7頁，倒數第三行錯字，中央氣象「數」。	已修訂，感謝委員指正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	第3-10頁，第一行文字錯誤，「今「天」度本計畫優先選擇河床...」。	已修訂，感謝委員指正。
九	圖20 24，微地動儀裝了幾組？試驗場址請用平面圖標註。	已修訂，詳見期末報告書。
十	第4-2頁，錯字，「加強水聲計硬體於野外「詩」作的可行「信」。	已修訂，感謝委員指正。
十一	結論第二大段的文字，在前面章節未多做討論，如果直接在結論中出現，比較不恰當。	結論第二大段落的文字說明的主要根據期末報告書中圖17至圖20之分析成果。請詳見期末報告書「第三章 工作執行成果」。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十二	在不同粒徑和密度的智能球試驗中，哪些因素最顯著地影響了顆粒運動及力學參數的準確性？如何改進智能球的設計以提升數據的可靠性。	112 年計畫執行年度，本研究已利用室內水槽試驗來開發與測試智能球之性能，然而，面臨時間解析度不足以及智能顆粒密度低於真實泥砂顆粒條件等挑戰，另外，在野外試驗情境下，亦需要克服野外水下強力的水文環境條件，因此，本年度團隊在設備的穩定性、感測精度、數據存儲和時間同步性等方面做了精密設計，並特別針對設備的外殼進行了模擬製作，使其重量和形狀接近自然泥砂顆粒(目前顆粒直徑為 7 公分、密度為 1.8g/cm^3 ; 如圖 30)，進一步提升了在野外測量的真實性和數據的代表性。請詳見期末報

項次	審查意見	回覆辦理情形
		告書「第六節 2.野外試驗之智能球開發與測試」。
十三	報告中提到的震波物理模型中的係數（如 C_2 至 C_5 ）的不確定性對模型預測的影響有多大？有何具體方法可以進一步降低這些參數的不確定性。	C_2 至 C_5 係數需透過主動式震源敲擊試驗與被動式表面波分析法，是可以直接降低模型參數之不確定性。請詳見期末報告書「第二章 工作執行與方法步驟」之 2.主動式震源敲擊試驗與被動式表面波分析法。
十四	DAS在野外試驗中的表現如何？在實驗中，DAS的數據是否能夠穩定且準確地反映河床載的動態變化？相較於其他傳感器，其優勢和不足有哪些？	本計畫預計將光纖安裝於野外試驗場的底床中及試驗和渠道的岸邊，嘗試記錄渠槽試驗過程中可能的水流作用及相關泥砂顆粒運作所造成光纖的應變紀錄。在此，亦以條

項次	審查意見	回覆辦理情形
		列方式逐點說明 DAS 在監測應用上的優勢: (1)雖然 DAS 主機本身單價高,但是若是考量長距離的觀測(數公里至數百公里),光纖纜線因應不同 Gauge length 的設定轉換成觀測站點數量後,會比佈設傳統地震儀划算許多、(2)高時間取樣率,可達 400 Hz 至 100 kHz、(3)光纖可安裝於惡劣環境,特別是其可耐高溫,易應用於井下觀測。 由攝影畫面可得知上游水流約在 10:26:50 秒抵達固床工光纖熔接位置,檢查光纖於該時段之 30 秒時序紀錄,可以清楚觀察到在頻道數 370 至

項次	審查意見	回覆辦理情形
		380 之間可以看到顯著的相位變化(phase change, $\Delta\phi$; 圖 43)，可以將相位變化乘以 11.6×10^{-9} 常數，最終再乘以取樣率 1,000Hz，將相位變化轉換成應變率(strain rate, ε)。目前本研究作圖所使用的調色盤色調範圍設定為-600 及 600 之相位變化，對應的應變率為 $\pm 1.16 \times 10^{-5}$，其代表上游水源水量通過可造成的應變率變化。 由於 DAS 的資料有 300 多個頻道，資料量大尚需要額外的時間進行分析，若有機會獲得計畫第三年的補助，將會呈現相關 DAS 於河道水砂運移作

項次	審查意見	回覆辦理情形
		用之紀錄分析成果。 請詳見期末報告書「第六節 4.河道光纖紀錄之初探 (Fluvial DAS)」。
十五	報告中提到使用RGBD深度圖像及深度學習模型進行粒徑分析，這種方法在實際應用中的精度如何？是否存在一些特定的環境或條件會影響分析結果的準確性？	本研究人工智慧型可攜式即時粒徑掃描儀 (AI-RPiGS-Scanner) 有一套嚴謹的精度率定及檢核之程序，主要技術是根據是自動辨識影像中之標準粒徑樣板(本研究有兩組樣板大小：195mm 及 320mm)。請詳見期末報告書「第六節 1.底床沖淤變化與粒徑分析成果」。
十六	在惠蓀林場蘭島溪試驗場進行的大型試驗中，儀器配置和河道整理過程中遇到的主要	本年度野外試驗為第一次在惠蓀二號橋蘭島溪進行，由於尚未完成率定能高大圳水源

項次	審查意見	回覆辦理情形
	挑戰是什麼？未來計畫中，有哪些改進措施可以提高試驗效率和數據質量？	供應流量與水門開口大小之關係，因此，本次實驗直接將水門全開導致試驗渠道中的流量有過大的趨勢(至少大於 1 cms)，導致渠道底床原先的 30 公分土砂層直接受到嚴重的沖刷侵蝕，未來可考慮透過多次的放水來率定上游供應源的流量大小，以達到可控制流量之試驗之目的。上述提及之嚴重沖刷作用亦導致 DAS 纜線在試驗中後段期間，已呈現漂浮在水體中的狀態，未來也需要考慮如何讓 DAS 纜線可以完全的固定在底床材料。本次野外試驗為防止入流水源由渠道底床及側壁入滲至地下，因此使用防水布將渠道

項次	審查意見	回覆辦理情形
		周遭邊界覆蓋，未來若水量為準確可控制，將可以不使用防水布，且可以使用較大粒徑之泥砂進行底床護甲。 本計畫執行兩年期間，在室內渠槽試驗有相對完整的定性與定量分析成果，本年度期中階段花費相對較多的時間進行野外渠道整理工程與相關監測及調查設備之開發率定之工作，後續又受到兩起颱風事件影響，導致接近期末階段10月20日才順利完成野外渠道試驗，後續將持續擬提「利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型(3)」第三期計畫申請書，預計完成第二期時序資料與調查成果的定量分

項次	審查意見	回覆辦理情形
		析。期望最終得以有效提升震波式推移載分析技術在河川推移載量測上的應用價值。

附錄、計畫內容審查意見及意見回覆

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本計畫擬開發自製式六軸感測之粒子追蹤器，勇於嘗試，值得肯定，亦可嘗試進行之，惟其模擬硃石運動之追蹤器形狀、重量、表面碰撞磨損等特性，宜詳加考慮，尤以信號傳輸功能可否容易補捉，宜有周全之設計。	感謝委員的肯定與建議。112年計畫執行成果已顯示，智能球裝置目前的資料取樣率過低，不足以詳細探討顆粒碰撞底床材料的行為；再者，受限於智能球的外殼材料及密封考量，目前裝置之最大密度值僅能略大於水的密度。因此，113年計畫執行年度將持續檢討與動態修正智能球之相關硬體設計(重量及外殼材料)、資料儲存方式及相關供電問題。
二	本年度對分散式光纖感測器之河床載作用探討，宜說明河床載作用所指如何，以明確瞭	感謝委員意見。分散式光纖感測器 (Distributed acoustic sensing; DAS)的感測原理為

項次	審查意見	回覆辦理情形
	解該研究主題。	DAS 主機接上單模光纖，由主機送出波長 1550nm(雷利)的雷射脈衝，沿途雷射光經過光纖製造過程的雜質，可產生 Rayleigh scattering，後散射光可返回到 DAS 主機，其中散射傳遞的時間與散射發生位置成正比，因此，量測雷射光在傳遞中的相位變化即可獲得空間中特定位置的應變 (strain)，且此形變為沿著光纖纜線的方向，其有別於傳統地動感知器，地震儀主要記錄三軸向地動速度值。一般而言，光纖主機量測到的相位資料乘上特定轉換常數即可獲得相對應變(relative strain)，並透過時間微分計算可求得應

項次	審查意見	回覆辦理情形
		變率(strain rate)，應變率再進行空間積分計算，即可獲得速度場資料，上述速度場資料即為傳統地震儀的紀錄。過去，地震儀已廣泛地被應用於量測水流作用、河床載作用、土石流事件等震源所產生的地動訊號，且皆以非接觸式的概念進行監測應用(例如：地震儀皆安裝於河道兩岸)。 本計畫預計將光纖安裝於野外試驗場的底床中及試驗和渠道的岸邊，嘗試記錄渠槽試驗過程中可能的水流作用及相關泥砂顆粒運作所造成光纖的應變紀錄。在此，亦以條列方式逐點說明 DAS 在監測

項次	審查意見	回覆辦理情形
		應用上的優勢：(1)雖然 DAS 主機本身單價高，但是若是考量長距離的觀測(數公里至數百公里)，光纖纜線因應不同 Gauge length 的設定轉換成觀測站點數量後，會比佈設傳統地震儀划算許多、(2)高時間取樣率，可達 400 Hz 至 100 kHz、(3)光纖可安裝於惡劣環境，特別是其可耐高溫，易應用於井下觀測。 上述補充說明內容，將會於期中報告書中進行新增與修訂。
三	在複雜環境條件下，應注意感測器和儀器可能會有準確度不準的問題。	感謝委員提醒。本計畫在感測器與其它相關儀器設備皆會於室內渠槽試驗中進行率定；然而，在野外試驗時，亦

項次	審查意見	回覆辦理情形
		會於試驗進行後進行相關感測資料的品質測定。
四	注意野外試驗的不確定性，可能對實驗結果產生影響，野外試驗總是會有些突發事件發生。	感謝委員提醒。本計畫在執行野外試驗前，會盡可能周詳的考慮所有可能會發生的狀況；利用在野外試驗的規劃，也會儘可能在滿足實驗需求下降低試驗成本，希望可以爭取更多次的野外試驗機會。
五	本案利用地震儀實際量測河道推移值並建立模型，可進一步了解河床泥砂運動。	感謝委員建議。本計畫將會納入河床泥砂運動行為之探討項目。
六	本案有詳細之儀器及試驗設備介紹，惟可再補充試驗是否有設計比對組及數量之說明。	感謝委員建議。本計畫將於期中報告書階段，進行相關野外試驗的設計組數與儀器數量配置情形之說明。