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

執行單位：國立陽明交通大學

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：趙韋安 副教授

共同主持人：洪啟耀 副教授

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)



利用現地試驗來驗證震波式推移質跳躍模型

摘要

穩定且連續性的河床載通量估算對於諸如河道工程與修復、洪水風險減災等各種應用至關重要。近年來數種考慮不同河床載運移機制作用的震波式物理模型已被提出，這為實際量化野外河床載觀測提供了可能的機會。然而，目前為止在應用上仍然缺乏野外實際河床載通量量測值來進行震波式模型驗證。在實際應用震波模型，其假設的泥砂撞擊運動學（彈性和速度）和顆粒動力學對於實現河床載計算的不確定性影響甚大；模式中關於地震相關參數，如剪力波波速和地震品質因子亦會影響模型預估的準確性。因此，本研究規劃了數組室內渠槽試驗，配合智能泥砂顆粒(3 軸加速度計)、地聲計及水聲計，來進行量測泥砂躍移作用之運動及力學參數。關於泥砂粒徑，本研究進行了一系列基於圖像的卵石顆粒粒徑掃描法，以研究河床表面的泥砂顆粒粒度分佈曲線資料。針對預計進行的野外大型試驗渠道場域，進一步運用主/被動震波實驗來獲得地震波衰減和傳播特性參數。本研究將進行人工控制供水之渠槽實驗數次，其為穩定流量 4.2 立方公尺每秒且水深恆定於 0.2 公尺。本研究將通過比較現場測量的河床載質量和沉積物顆粒追蹤器之衝擊力時序紀錄來評估各家震波模型(Tsai et al., 2012; Auel et al., 2017; Gimbert et al., 2019)之可行性。最終本研究

將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。

關鍵詞：河床載通量、震波物理模型、室內渠槽試驗



Validation of seismic bedload saltation model based on field experiment

Abstract

Reliable bedload flux estimations are necessary for a variety of applications such as sedimentation engineering, flood risk mitigation and river restoration. Several seismic physical models with considering different bedload transport mechanisms have been proposed, which provided an opportunity to have quantitative observations in practical. However, a lack of direct measurements of bedload fluxes in field application cause a challenge for the validation of seismic models. In the practical applicaiotn, the impact kinematics (elasticity and velocity) and particle dynamics assumed in models are crucial for achieving high accuracy in bedload inversion. On-site seismic parameters such as the shear-wave velocity and the seismic quality factor are also required to reduce the uncertainty in model prediction. Thus, this study conducts bedload transport experiments in a flume laboratory to understand the kinematics and mechanics of particle transport by using the smart rock embedded with accelerometers, geophone and hydrophone. We will evaluate the performance of the different models (Tsai et al., 2012; Auel et al., 2017; Gimbert et al., 2019) by comparing in-situ measurements of bedload mass and impact forces recorded by the smart rock. For the study site of the field experiments, we have finished the active and passive seismic surface wave exploration to investigate the properties of wave propagation and attenuation. Finally, we will also explore the effect of the process of rolling and/or sliding particels, as opposed to saltating particles,

contributing in seismic signal generation.

Keywords: bedload flux, seismic physical model, experiments in a flume laboratory



目次

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	VIII
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	2-16
第三節 試驗規劃彙整與震波模型初探	2-20
第四節 室內渠槽試驗成果彙整	2-37
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫交付項目	3-1
第四章 結論及建議	4-1
第一節 結論	4-1
第二節 建議	4-3

參考文獻.....	參-1
-----------	-----

附錄、計畫內容審查意見及意見回覆(委員)



表次

表 1	渠槽試驗智能求配置表	2-23
表 2	渠槽試驗流速與水深資料表	2-24
表 3	實驗監測、調查與工程施作設備	2-29
表 4	震波躍移物理模型輸入參數	2-33
表 5	計畫重要檢核點管制表	3-3



圖次

圖 1	水位與功譜密度季節性的遲滯現象(BURTIN ET AL., 2008).....	5
圖 2	不同粒徑分佈之預測功譜密度分佈曲線(LAGARDE ET AL., 2021)	6
圖 3	MASW 及一維速度反演分析方法流程(OLAFSDOTTIR ET AL., 2018)	11
圖 4	雷利波倒退式橢圓軌跡與向量(SCHIMMEL ET AL., 2011).....	11
圖 5	被動式表面波分析法流程	12
圖 6	影像法粒徑分析流程	13
圖 7	自製顆粒碰撞感測器(HUNG ET AL. 2022)	16
圖 8	透過多台攝影機建置表面流速示意圖(HUNG ET AL. 2022)	18
圖 9	本計畫自製水聲計	19
圖 10	室內渠槽試驗規劃及配置圖	21
圖 11	三種不同密度之智能泥砂顆粒	22
圖 12	實驗場地配置圖	28
圖 13	試驗調查與儀器配置示意圖	28
圖 14	被動式表面波分析成果	32
圖 15	頻率相依之震波品質因子	33
圖 16	理論功譜密度曲線	34

圖 17	震波式物理模型機制分類圖	36
圖 18	自由放落試驗之時頻圖與時序 PSD.....	38
圖 19	幫浦馬達開啓期間之時頻圖	39
圖 20	頻譜值隨著頻率的變化	39
圖 21	第六組試驗之(左)時頻圖、時序地動速度值與平均	41
圖 22	第六組試驗之三軸向加速度紀錄(黑色)與角速度資料(藍色).....	42
圖 23	第六組試驗之 HYDROPHONE 時序資料(黑色)及時頻圖與綜合 加速度紀錄(藍色).....	43
圖 24	第二十三組試驗之時頻圖、時序地動速度值與平均 PSD.....	44
圖 25	第二十三組試驗之 HYDROPHONE 時序資料(黑色)及時頻圖 ...	45





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。針對泥砂顆粒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」；量測方法將採用 USFS 型採樣器及土砂運移顆粒感測器(本研究測試開發中)。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敲擊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)，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。本計畫執行第一年度預計進行室內渠槽試驗，控制適當的流量及坡度，進行智能泥砂顆粒(smart rock; 三軸向加速度計與三軸旋轉陀螺儀)運移觀察，並配合攝影測量、環境為地動訊號及水聲訊號等量測方式，釐清相關感測器記錄數據對於泥砂顆粒運移機制及水流作用的關聯性，並同時測試多種震波式泥砂躍移模式之適用性評估。根據上述的室內試驗成果，本計畫(預計為第二年度執行)將進一步藉由蘭島溪之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) 在人工泥砂料源中混合不同粒徑的智能泥砂顆粒(smart rock)，來了解在試驗時不同粒徑泥砂之運移路徑、相關運動及力學參數，(7)利用微地動觀測網與

分散式光纖感測器(distributed acoustic sensor, DAS; 為新興的感測技術, 為本計畫重要的儀器配合)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。上述工項項次(2)及項次(7)中 DAS 皆僅能在大型野外試驗場進行測試。

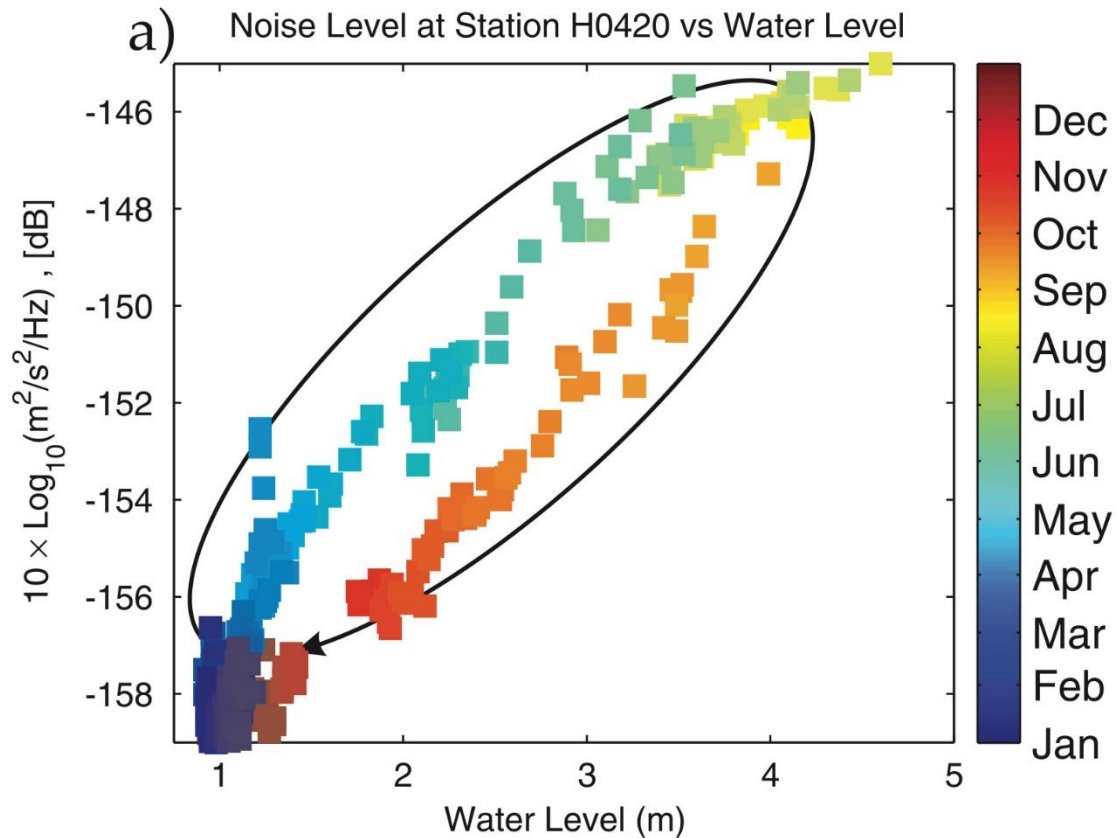


圖 1 水位與功譜密度季節性的遲滯現象(Burtin et al., 2008)

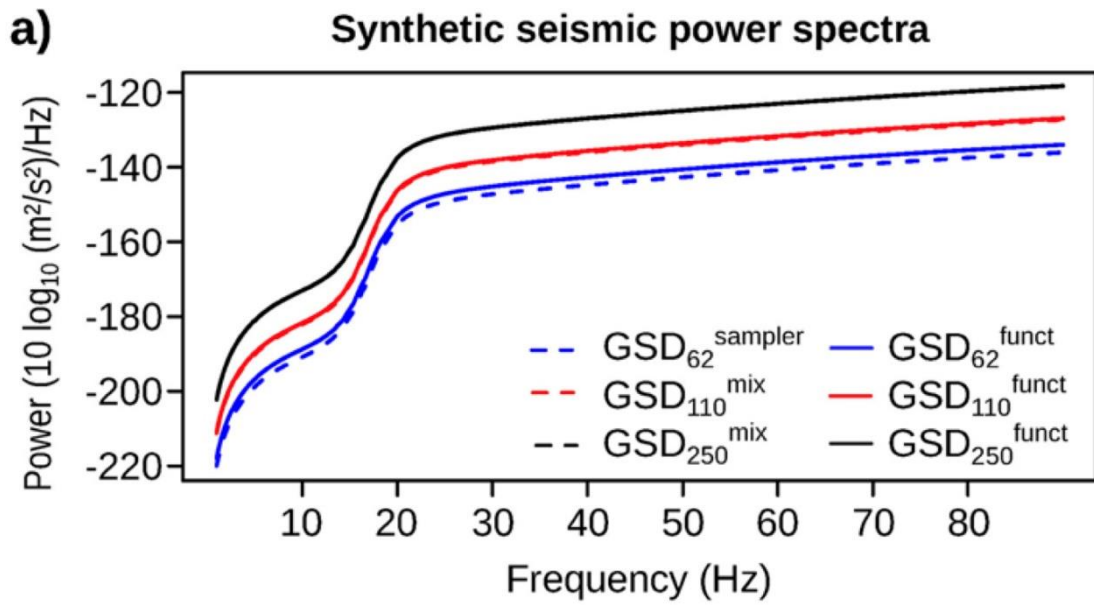


圖 2 不同粒徑分佈之預測功譜密度分佈曲線(Lagarde et al., 2021)



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，期能以室內渠槽試驗進行相關感測器與調查技術之測試及率定，進一步於現地可控制的野外河川試驗場址(ephemeral channel)-蘭島溪，運用多種量測、監測及調查方法得以有效控制水文、泥砂、地形等現地條件，獲得試驗當時的推移載資料。利用實測的推移載作為參考數據，進行震波式推移質跳躍模型對於推移載反算問題之誤差分析評估，並提出震波物理模型在應用上的策略，主要策略聚焦在降低推移載之不確定性(底床及運移的泥砂粒徑、震波格林函數計算參數)、評估泥砂跳躍式撞擊河床的物理經驗式之適用性、發展震波物理模型河川適用性評估方法，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：

$$|i2\pi f u(f, x_s, D, x_f)| = 2\pi f \bar{F}(f, D, x_f) G(f, x_s; x_f) S(f, x_s) \quad (2)$$

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):

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

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:

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

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)：

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

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)：

$$c(b) @ \ln(1 + \frac{1}{b}) e^{-2b} + (1 - e^{-b}) e^{-b} \sqrt{\frac{2p}{b}} \quad (10)$$

$$b = 2pr_0(1 + C_4) f^{1+C_4 \cdot C_5} / (v_{c0} C_3 f_0^{C_4 \cdot C_5}) \quad (11)$$

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):

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

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：

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

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($1,000 kg/m^3$)。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:

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

$$t_{cD50}^* = \exp[a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4] \quad (19)$$

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

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:

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

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

其中 U 為深度平均流速(m/s)定義如下(Parker, 1991):

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

其中 k_s 為底床粗糙程度, 本計畫假設為 3 倍的中位粒徑($3D_{50}$; Kamphuis, 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):

$$\bar{w}_s = \frac{\hat{H}_b w_{st} \cos \theta}{2 \ln \frac{\tau_c^*}{\tau_c^*} + \sqrt{e^{\hat{H}_b} - 1} \frac{U}{U}} \quad (23)$$

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:

$$\hat{H}_b = \frac{3C_d r_f H_b}{2r_s D \cos q} \quad (25)$$

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):

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

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):

$$w_i = \sqrt{\frac{4RgD}{3Cd}} \cos q \left[1 - \exp \left(- \frac{3C_d r_f H_b \sin q}{2r_s D \cos q} \right) \right]^{0.5} \quad (30)$$

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

$$w_i = 0.51 \sqrt{RgD} \frac{\alpha^*}{\epsilon t_c^*} - 1 \frac{\dot{\sigma}^{0.25}}{\sigma} \quad (32)$$

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(11)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 3)。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(36)及(37)，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)。

$$v_c^{\text{model}} = v_{c0} \frac{C_2}{C_3} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{C_4} \quad (36)$$

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

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(38)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)：

$$|\dot{u}(f, r_i)|^2 = \frac{C_2 k p f S}{8 r_s v_c v_u} \times \frac{C_2}{C_3} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{C_4} \exp(-2 \rho f r_i / (v_u C_3)) \quad (39)$$

$$ps = |\dot{u}(f, r_i)|^2; A(f) = \frac{C_2 k p f S}{8 r_s v_c v_u} \times \frac{C_2}{C_3} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{C_4} \times \frac{2}{\rho k} \quad (40)$$

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(41):

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

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):

$$\ln \frac{sp \cdot r_i}{(sp \cdot r_i)_{\min}} = \ln \frac{A(f)}{(sp \cdot r_i)_{\min}} - \frac{2pf_i}{v_u C_3} \quad (42)$$

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 4 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 P_1 及 P_2 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 5。

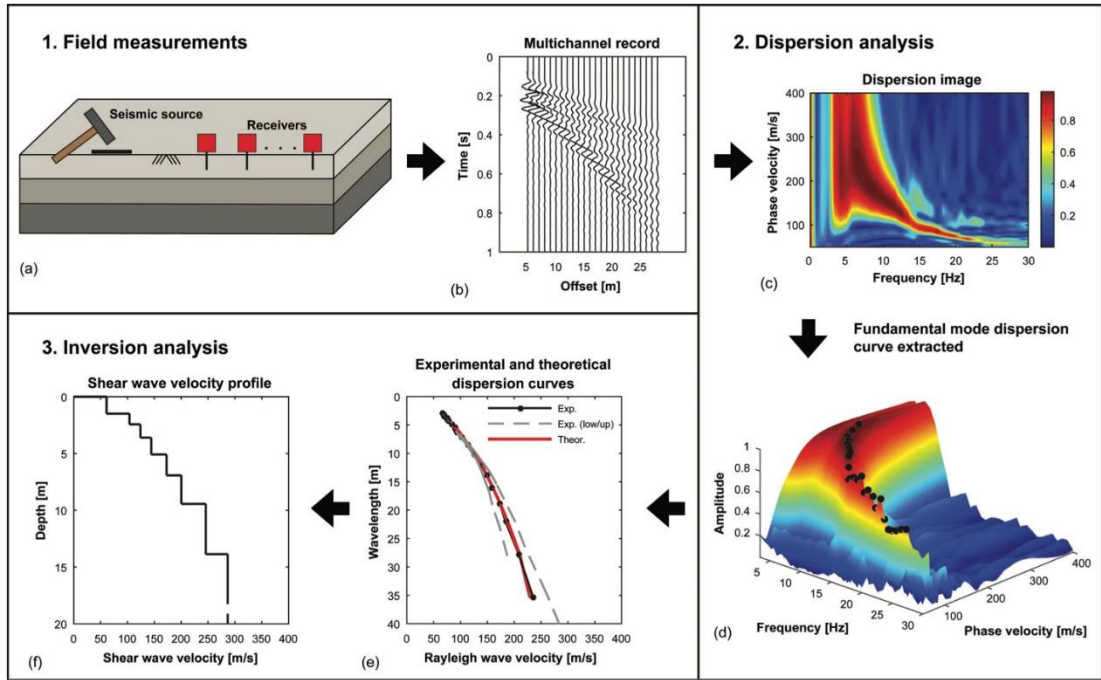


圖 3 MASW 及一維速度反演分析方法流程(Olafsdottir et al., 2018)

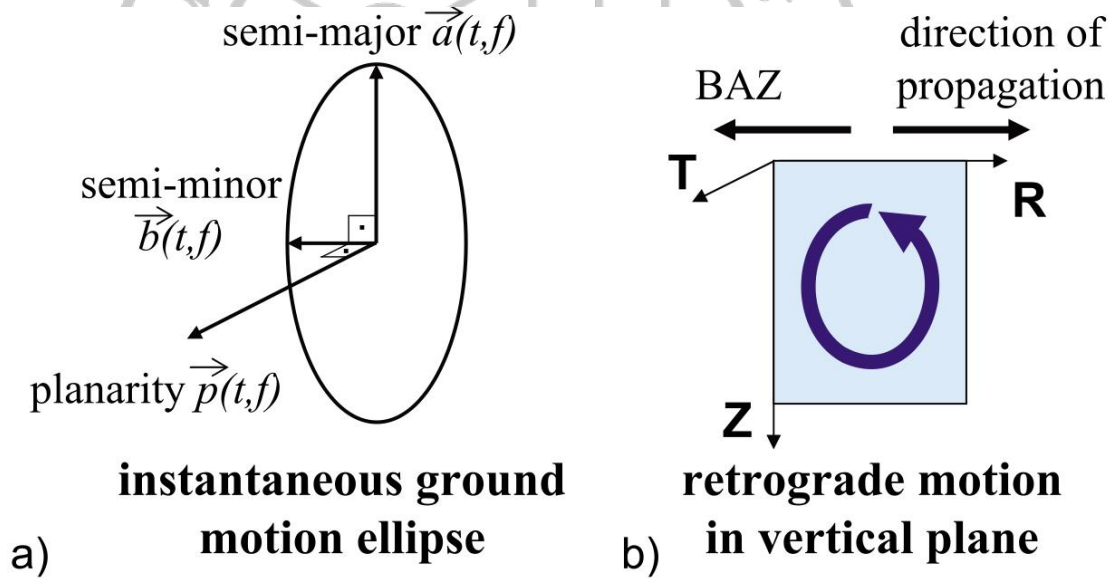


圖 4 雷利波倒退式橢圓軌跡與向量(Schimmel et al., 2011)

DOP Analysis and Vs Inversion

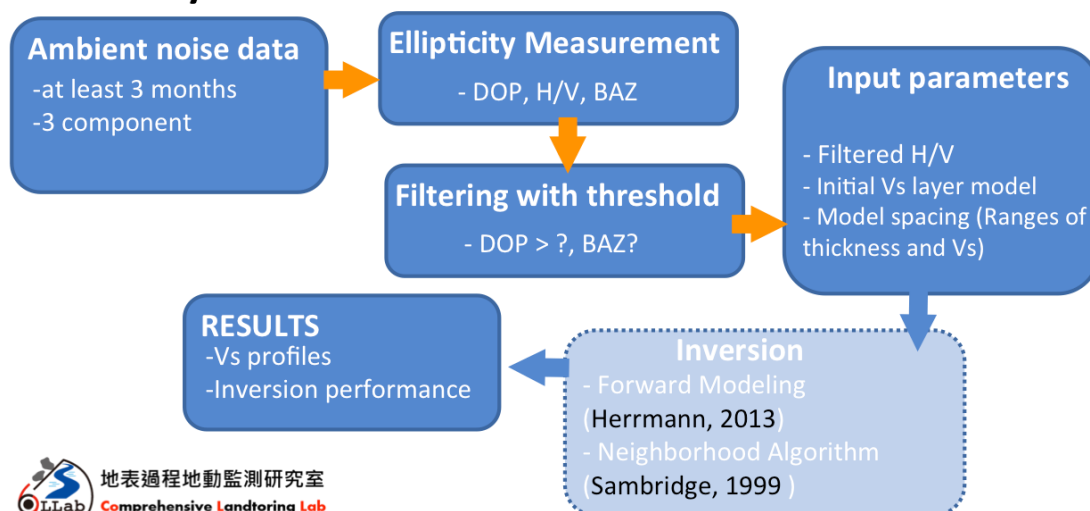


圖 5 被動式表面波分析法流程

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 6 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。

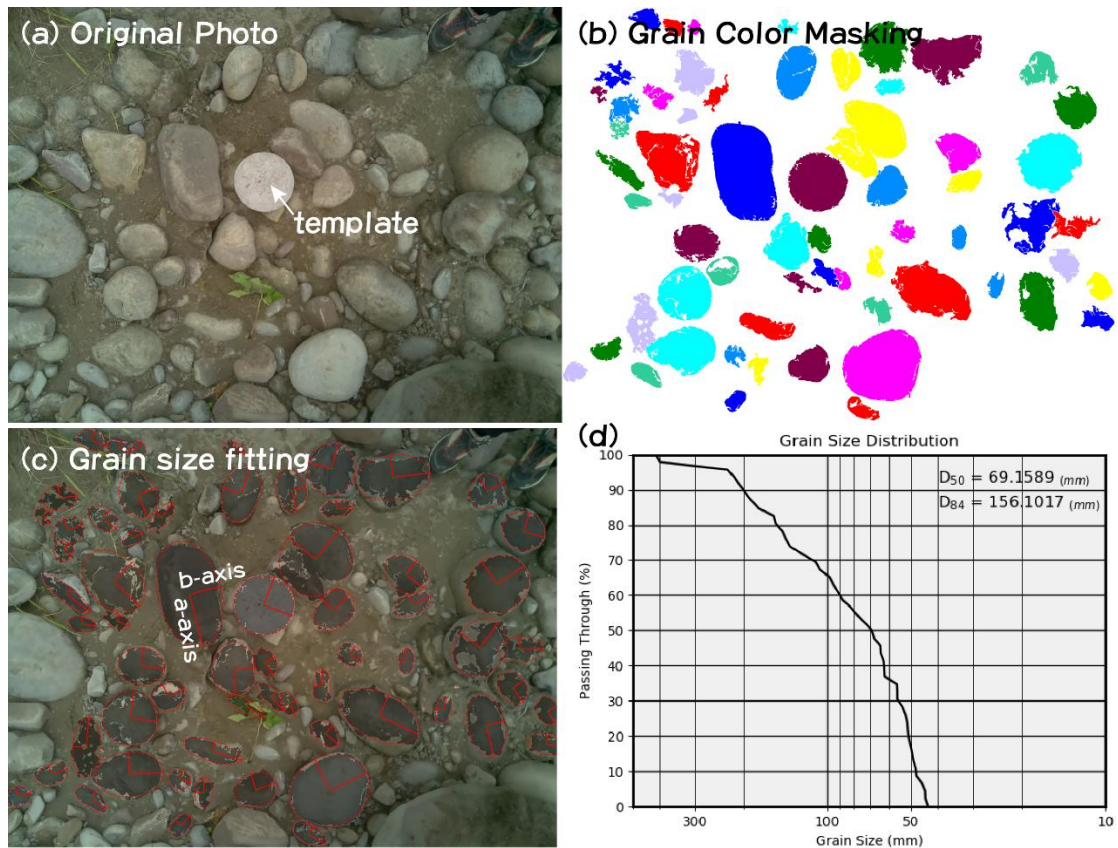


圖 6 影像法粒徑分析流程

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(本計畫稱之為智能泥砂顆粒, smart rock)，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 7，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 6.5 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。

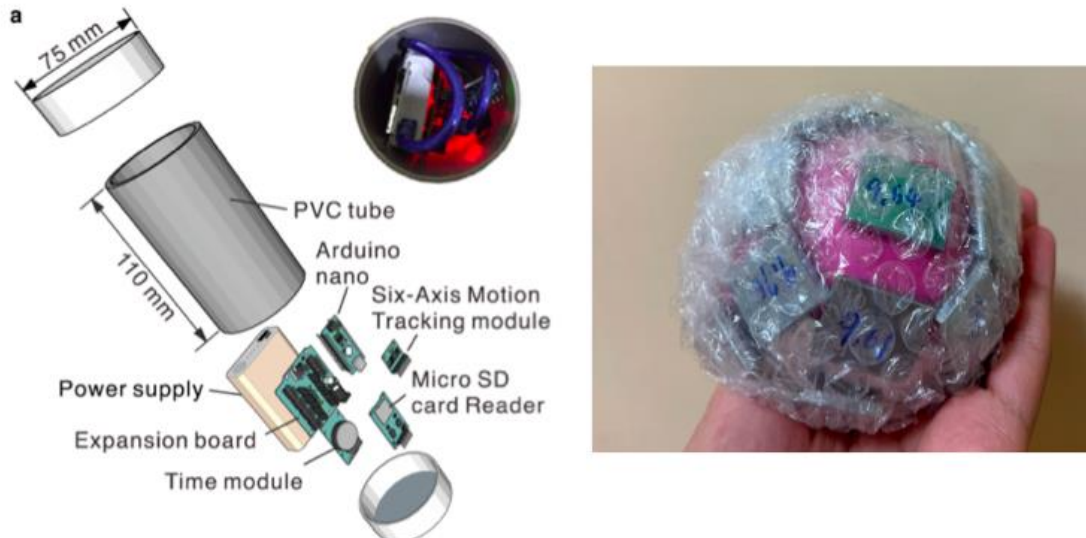


圖 7 自製顆粒碰撞感測器(Hung et al. 2022)

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 2 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 (Tsorng 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 8，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：

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

其中 $\bar{X}_a = (x_a, y_a, z_a)$ 為顆粒之三維空間座標， $\bar{p}_i = (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$ 為相機 i 之空間位置向量， l_i 為自由參數， $\bar{q}_i = (x_{qi}, y_{qi}, z_{qi}) = \bar{d}_i + g_i \bar{r}_i + r_i \bar{c}_i$ 為相機 i 至顆粒在影像 i 上位置之空間向量， $\bar{d}_i$ 為影像 i 原點(左上角)的位置向量， $\bar{r}_i$ 為影像 i 的橫軸向量， $\bar{c}_i$ 為影像 i 的縱軸向量， (g, r_i) 為顆粒在影像 i 上的座標。根據率定可知 $\bar{X}_a, \bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3, \bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3$ ，公式(47)僅剩三個未知參數 (l_1, l_2, l_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 8)。

$$\begin{bmatrix} \vec{q}_1^T \vec{q}_1 & -\vec{q}_1^T \vec{q}_2 & 0 \\ \vec{q}_2^T \vec{q}_1 & -\vec{q}_2^T \vec{q}_2 & 0 \\ -\vec{q}_1^T \vec{q}_3 & 0 & \vec{q}_1^T \vec{q}_3 \\ -\vec{q}_3^T \vec{q}_1 & 0 & \vec{q}_3^T \vec{q}_3 \\ 0 & \vec{q}_2^T \vec{q}_2 & -\vec{q}_2^T \vec{q}_3 \\ 0 & \vec{q}_2^T \vec{q}_3 & -\vec{q}_3^T \vec{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{q}_1^T (\vec{p}_2 - \vec{p}_1) \\ \vec{q}_2^T (\vec{p}_2 - \vec{p}_1) \\ \vec{q}_1^T (\vec{p}_1 - \vec{p}_3) \\ \vec{q}_3^T (\vec{p}_1 - \vec{p}_3) \\ \vec{q}_2^T (\vec{p}_3 - \vec{p}_2) \\ \vec{q}_3^T (\vec{p}_3 - \vec{p}_2) \end{bmatrix} \quad (48)$$

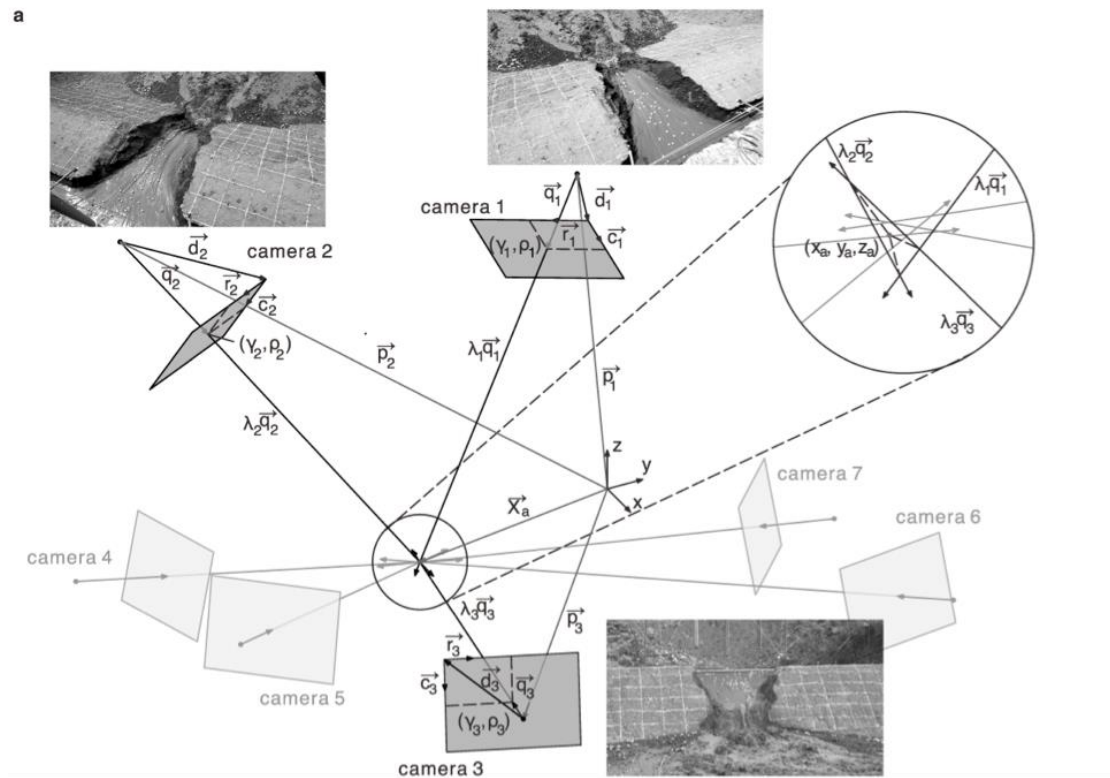


圖 8 透過多台攝影機建置表面流速示意圖(Hung et al. 2022)

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 9 所示。

Stand-alone-hydrophone

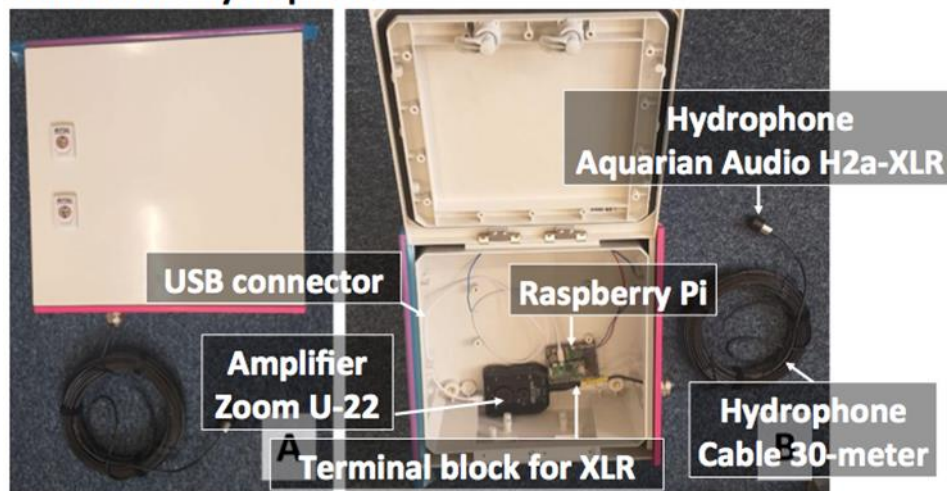


圖 9 本計畫自製水聲計



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)、推移質相關運動及力學經驗參數(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 、Shield 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將優先進行室內渠槽試驗，本實驗使用的人工渠道為鋼構渠道(圖 10)，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。本年度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 11;分別為白球 1.252 g/cm^3 、黑球

1.113 g/cm³、紅球 0.974 g/cm³；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 1~6 顆智能泥砂顆粒(渠槽斷面位置 0；表 1)，本年度已完成 21 組實驗，實驗中在渠槽斷面位置 1 的底床流速落在 0.43~0.69 m/s、表面流速為 0.53~0.85 m/s、水深為 11~17 公分；斷面位置 3 的底床流速落在 0.38~0.52 m/s、表面流速為 0.46~0.70 m/s、水深為 14~19 公分，相關試驗流速及水深資訊詳列於表 2。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 10。



圖 10 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	1.252	1.113	0.974

圖 11 三種不同密度之智能泥砂顆粒



表 1 渠槽試驗智能求配置表

次	黑球	紅球	白球
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	-	-	1
5	-	-	1
6	1	-	-
7	2	-	-
8	2	-	-
9	2	-	-
10	-	-	2
11	-	-	2
12	-	-	2
13	-	-	2
14	-	-	2
15	-	-	2
16	3	-	-
17	6	-	-
22	1	-	-
23	-	-	1
24	1	-	1
25	1	-	1

資料來源：本計畫

表 2 渠槽試驗流速與水深資料表

次		位置 1	位置 3	位置 4	位置 5	位置 6	位置 7
1	底床流速(m/s)	0.43	0.38	-	-	0.26	-
	側邊流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	表面流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	水深(cm)	17	19	-	22	-	-
2	底床流速(m/s)	0.43	0.38	-	-	0.26	
	側邊流速(m/s)	-	-	-	-	-	
	表面流速(m/s)	-	-	-	-	-	
	水深(cm)	17	19	-	22	-	-
3	底床流速(m/s)	0.68	0.47	-	-	0.38	-
	側邊流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	表面流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	水深(cm)	11	14	-	-	17.5	-
4~6	底床流速(m/s)	0.69	0.42	-	-	0.38	
	側邊流速(m/s)	-	-	-	-	-	
	表面流速(m/s)	-	-	-	-	-	
	水深(cm)	11	-	15	-	-	17.2
7	底床流速(m/s)	0.63	0.42	-	-	0.26	-
	側邊流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	表面流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	水深(cm)	11	-	15	-	-	17.2
8~17	底床流速(m/s)	0.69	0.52	-	-	0.4	-
	側邊流速(m/s)	0.65	0.43	-	-	0.31 (0.29-0.31)	-
	表面流速(m/s)	0.85	0.7	-	-	0.52	-
	水深(cm)	11	14	-	-	17.5	-
22~25	底床流速(m/s)	0.51	0.44	-	-	0.35	-
	側邊流速(m/s)	-	-	-	-	-	-
	表面流速(m/s)	0.65	0.6	-	-	0.48	-
	水深(cm)	13.5	15	-	-	17.5	-

資料來源：本計畫

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):

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

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 、Sield 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($N_{SR}=1$)撞擊河床產生之理論功譜能量密度 P_{SR} 為：

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

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; Gimbert et al., 2019)，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):

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

公式(52)中的撞擊發生之機率密度函數 $p_b(t_b)$ 將可透過本計畫自製開發之 Hydrophone、智能球來辨識試驗中有效地撞擊次數與發生時間，計算個別碰撞發生的間隔時間來估計其機率密度函數。

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} ：

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

亦可以進一步預估試驗中的推移載通量 $q_{b,DSR}^{inv}$ ：

$$q_{b,DSR}^{inv} = N_{SR}^{inv} \frac{U_b V_{SR}}{WL_b} \quad (54)$$

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，預計於明年度計畫持續進行室內實驗，調整渠槽坡度、智能泥砂顆粒數量與密度、底床鋪面粒徑分佈等，待完成進行綜合成果歸納後，將室內實驗的執行經驗平行輸出至野外大型試驗，預計於惠蓀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，本實驗預計自北港溪引水，透過建置簡易的堰堤可穩定且大量的供給實驗使用流量，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與北港溪匯流處，如圖 12 所示。透過整地工程建置一寬 3~5 公尺、長 7~10 公尺之現地渠槽(真實尺寸待定)，並且於該渠道上游及下游處分別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 13。表 3 顯示實驗監測、調查與工程施作設備，其中項目顯示為藍色文字為室內槽渠試驗進行相關儀器設備驗證與率定之項目；儀器數量標示為待定則需視計畫明年度執行現地實驗之情況而定。

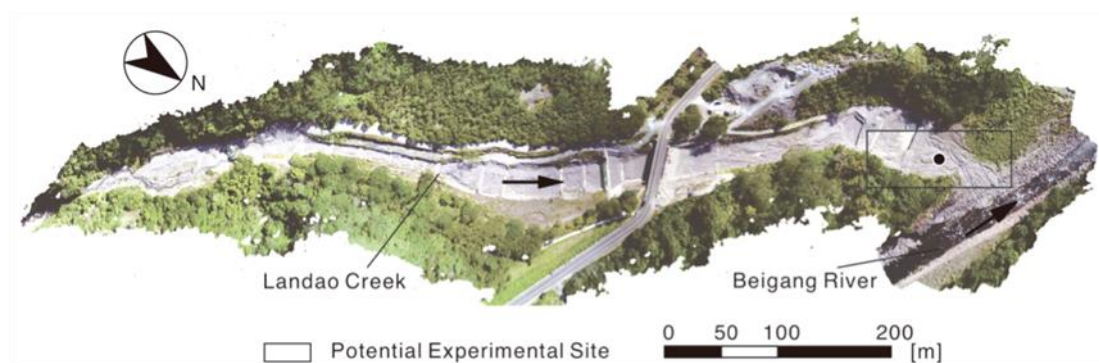


圖 12 實驗場地配置圖

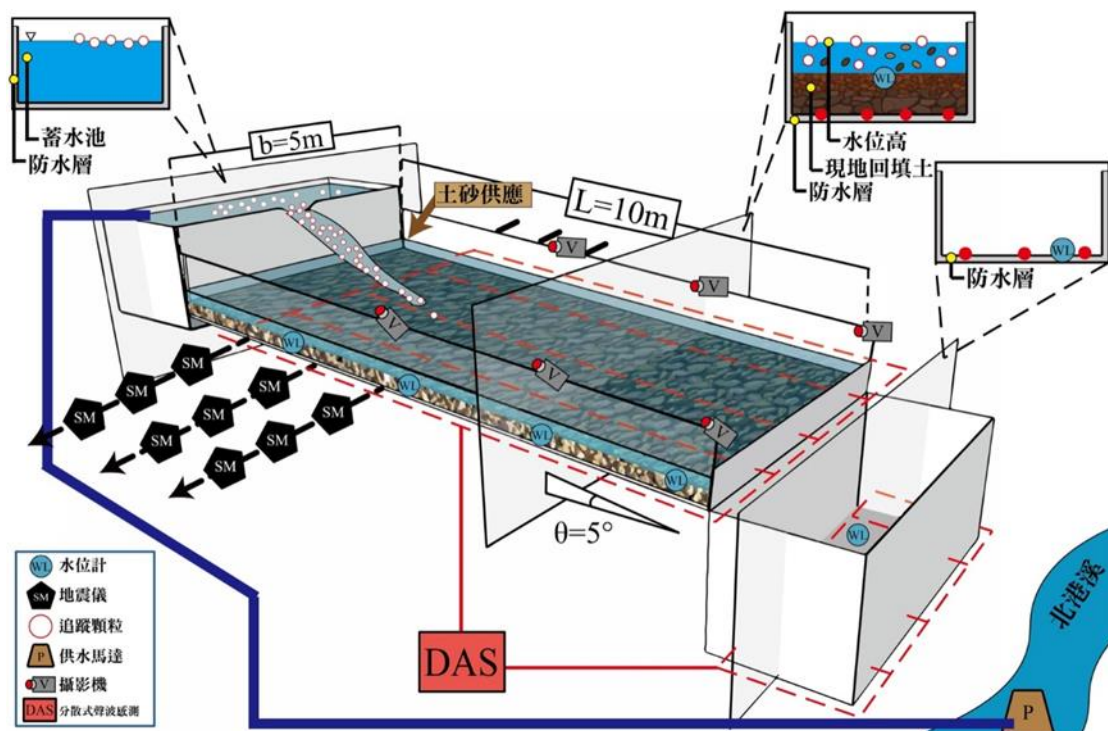


圖 13 試驗調查與儀器配置示意圖

表 3 實驗監測、調查與工程施作設備

(藍色字設備於室內槽渠試驗進行測試)

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 、 400 sampling rate	Ground velocity	共計 19 部
SmartSolos (IGU15,5Hz 三軸向)			
Silixa iDAS-v2	10m Gauge length 、 1k Hz sampling rate 、 2m Channel spacing	Strain of Riverbed	共計 150m
水文量測, Hydro-instrument			
HOBO-Onset U20 Water gauge	1 Hz Sampling rate	Water Stage	Riverbed 4 部 Tank 2 部 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	室內渠槽：1~6 顆粒數量 現地實驗：待定
• Smart Rock 智能球	30~250 Hz sampling rate	Impact force and frequency、trajectory	
• Auto-Sediment Supply	待定	待定	
• Grain-size distribution: image photo (RPiGS-Scanner, 自製) 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 Single-mode is for DAS	150m

針對實驗用水源部分，將透過數台高馬力之抽水馬達(型號 250EFB622, 30 HP, 揚程 15 m, 流量 0.1 cms)將北港溪主流水流抽至渠道上方蓄水池備用，待實驗進行時再將水流抽至渠槽內部使用。為達實驗成效，預計於渠槽內留有約 20 公分之水深，且為達其穩定流量($4.2 \text{ m}^3/\text{s}$)，預計使用約 42 台抽水機進行實驗（將依據最後使用抽水機型號進行）。

本研究於期末階段已完成室內渠槽泥砂顆粒躍移試驗、野外大型試驗規劃及整備(可控制渠槽之地形幾何條件)，針對野外大型試驗之格林函數參數值進行預估，已初步完成被動式表面波剪力波速度分析，並獲得震波躍移物理模式中輸入參數(圖 14)，如表 4 中的 α ($C_4 = \alpha / (1 - \alpha)$) 及 V_{C_0} 參數，透過上述兩個參數亦可以定義雷利波相位及群速度 (v_c 及 v_u)；關於震波品質因子 C_3 尚須透過主動式震源敲擊試驗求得，本計畫亦完成大型野外試驗場主動式震源敲擊試驗，其分析結果顯示(圖 15)震波品質因子成果在頻率 1 Hz 時 $Q_0 = 3.88$ (即為公式(44)中 C_3^0)，且頻率 10 Hz 至 100 Hz 對應的 Q 值(C_3)介於 8 至 14 之間($\eta = 0.29$; 即為公式(44)中的 C_5)，因此，本年度期末階段已針對野外大型試驗的震波物理模型參數中的係數 $C_2 \sim C_5$ 進行估算。在此垂直躍移震波物理模型初探分析中(Tsai et al., 2012)所使用的泥砂粒徑為過去潰壩試驗之現地樣坑式河床質採樣成果($D_{50} = 0.013\text{m}$ 、 $\sigma_g = 1.218$)，在假設模擬情境為完成彈性碰撞($C_1 = 2$; 可參考室內渠槽試驗的分析成果來動態調整)、試驗水深為 0.2 公尺、 q_b 推移載通量分別為 $0.0024\text{m}^2/\text{s}$ 及 $0.00077\text{m}^2/\text{s}$ (模型參數詳見表 4)，其功譜密度值(PSD)預測頻譜曲線如圖 16 所示。表 4 中的 q_b 輸入值為 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ ，然而震波物理模型中將考慮水文及泥砂條件(水深、泥砂粒徑)，推估泥砂顆粒運動及動

力行為，因此模型預測的推移載通量值僅可能小於或等於 q_b 輸入值，若等於 q_b 輸入值則代表所有的河床質泥砂皆可在模擬情境中進行躍移。在推移載通量較大的情境下，其頻率在 5Hz 以上之理論 PSD 由河床載作用所主導，其作用的峰值頻率在 135Hz 且 PSD 值為 -91.5dB，紊流作用的峰值頻率在 57Hz 且 PSD 值為 -128.2dB；當推移載通量較小的情境，頻率需要達 10Hz 以上才會以河床載作用所主導，在峰值頻率上的變化不大(紊流作用的主要頻率及 PSD 值與推移載通量較大的情境相同)，僅在河床載作用之峰值 PSD 降至 -101.5dB。目前本試驗規劃使用的感震器(詳見表 3)皆可記錄上述的頻率及功譜密度值的範圍。若試驗要以人工方式進行供砂，則泥砂粒徑級配可參考 $D_{50}=0.013\text{m}$ 、 $\sigma_g=1.218$ 進行設計。

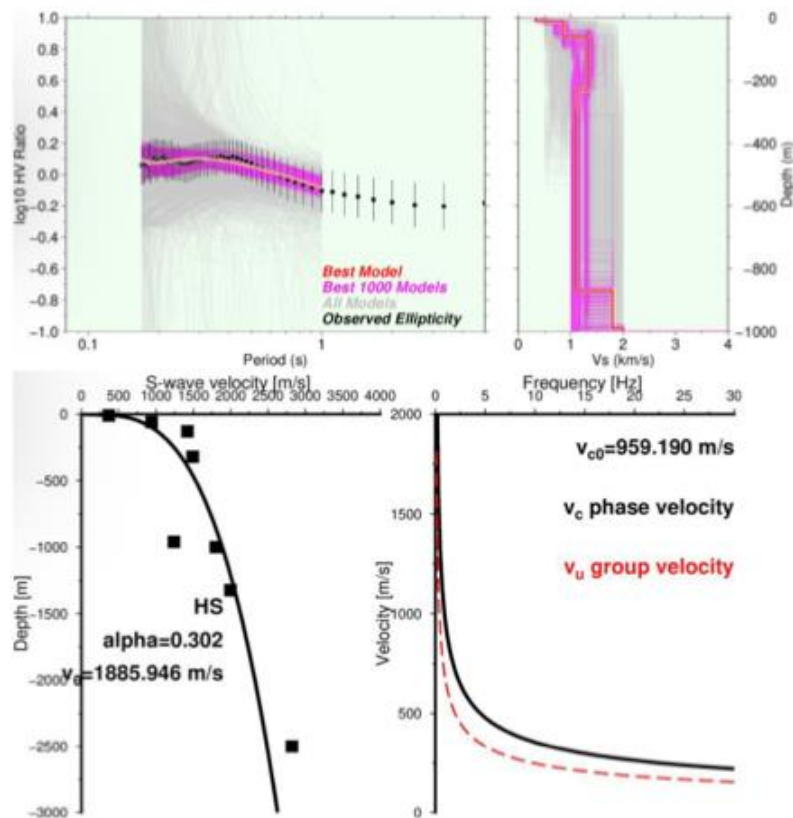


圖 14 被動式表面波分析成果

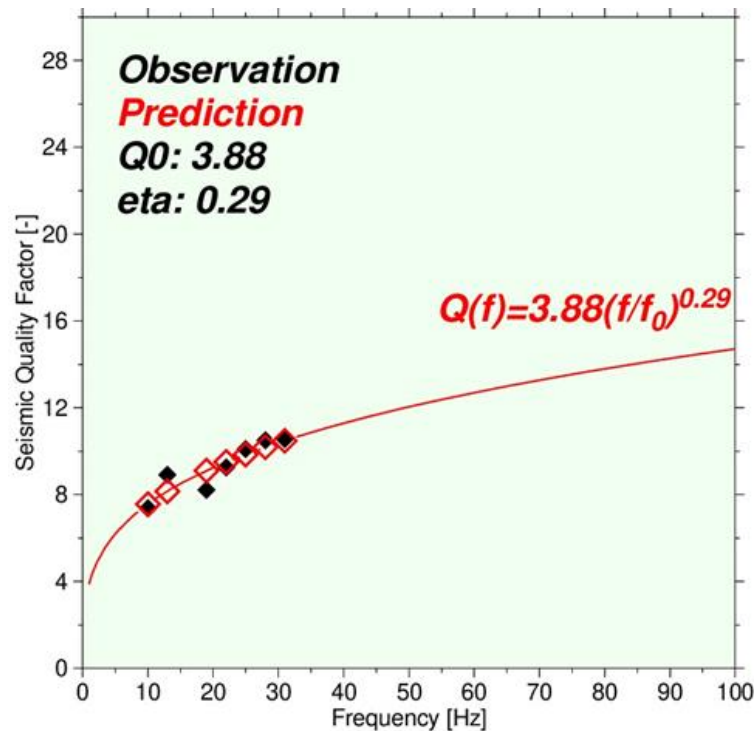


圖 15 頻率相依之震波品質因子

表 4 震波躍移物理模型輸入參數

Seismic Parameters	
$v_{c0}(\text{m/s})$	959.2
α	0.302
C_3	10(待定)
$r_0(\text{m})$	3(可控制)
River Geometry	
$\theta(^{\circ})$	5
$W(\text{m})$	5
$D_{50}(\text{m})$	0.013(待定)
σ_g	1.218(待定)
$\rho_s (\text{kg/m}^3)$	2600
Case Testing	
$H(\text{m})$	0.2
$q_b(\text{m}^2/\text{s})$	0.01(輸入值)

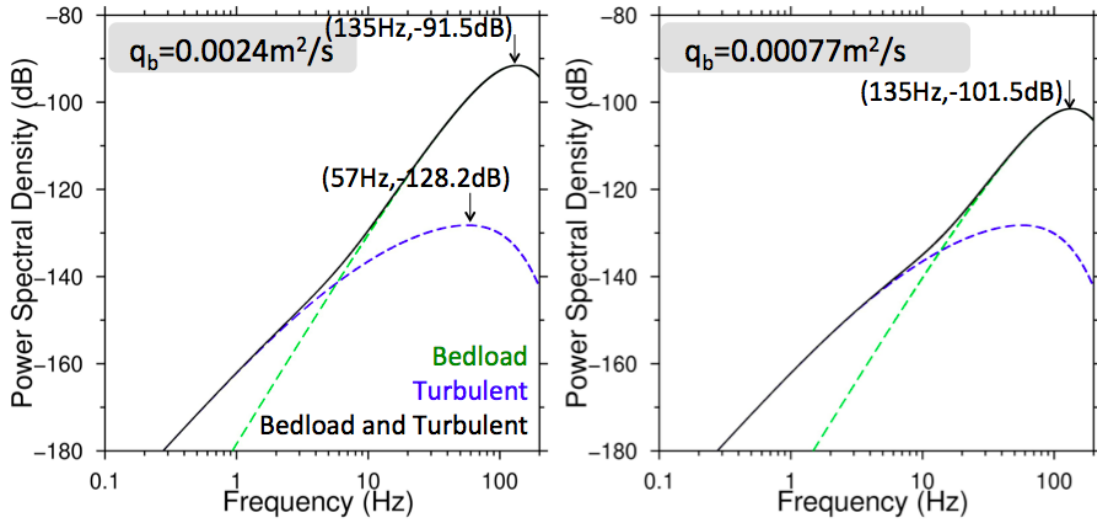


圖 16 理論功譜密度曲線

(綠色：河床載作用、藍色：紊流作用、黑色：複合作用)

在探討震波式躍移模型的可行性評估，必須嘗試將微地動訊號紀錄中的震動來源進行辨識，試驗期間兩個主要的震源為河床載作用及紊流作用。本研究為了釐清微地動感測器在不同的空間配置及泥砂粒徑情境條件之下，其微地動訊號主導的震源類型變化特徵。本計畫參照表 2 的物理模型參數，在固定水深(H)為 0.2 公尺的水文條件，且考慮河床載通量等於最大可運移通量的百分之一，測試不同的 D_{50} (0.01~2m)、測站與河心距離 r_0 (1.0~1,000m) 其理論功譜密度曲線，模型預測中的理論河床載及紊流對應的功譜密度表示為 $PSD^{bedload}$ 與 PSD^{water} ，並以條件 1(公式(55))與條件 2(公式(56))來定義主導的作用機制分別為紊流作用及推移載作用：

$$PSD^{water}(f_w^{peak}) > PSD^{bedload}(f_b^{peak}) \quad (55)$$

$$PSD^{bedload}(f_b^{peak}) > PSD^{water}(f_w^{peak}) \quad (56)$$

其中 f_w^{peak} 與 f_b^{peak} 分別為理論功譜密度在紊流及推移載模型中最

大 PSD 值所對應的頻率值，如圖 17 所示，紊流作用區間以藍色圓點表示，推移載作用區間以灰色矩形色塊表示。圖 17 的 Y 軸坐標則以水深除以底床粗造度 k_s ，本計畫暫定採用 3 倍 D_{50} 定義為 k_s (Kamphius, 1974)，圖 17 的複合式作用帶代表此區間條件下(同時有藍色圓點及灰色色塊)，並無法有效分離紊流及河床載作用在微地動訊號上的貢獻。舉例說明，若情境條件為 $r_0=3$ 公尺且 $D_{50}=0.013$ 公尺，即為圖 17 中的星好位置；當測站與河心距離大於 20 公尺，則 PSD 值會開始同時具有無法有效分離紊流與河床載的情境，且在距離大於 50 公尺時，PSD 主要受到紊流作用所貢獻。以上模型初探成果主要的測試條件是針對明年度預計執行的現地實驗，因此將會在執行數場現地試驗後進行相關驗證及率定分析；本年度計畫執行將聚焦於室內渠槽試驗，透過期末階段完成數場試驗，聚焦於基礎震波式推移質跳躍模式之開發、完成室內渠槽規劃並進行試驗、發展及率定相關設備儀器 (Hydrophone、Smart Rock、RPiGS-Scanner)、震波式模型初探與現地實驗規劃，並完成相關震波式模型驗證規劃，同時亦可進一步歸納及測試比較不同的躍移模式(Tsai et al., 2012; Auel et al., 2017; Gimbert et al., 2019)在評估推移載通量上的不確定性。

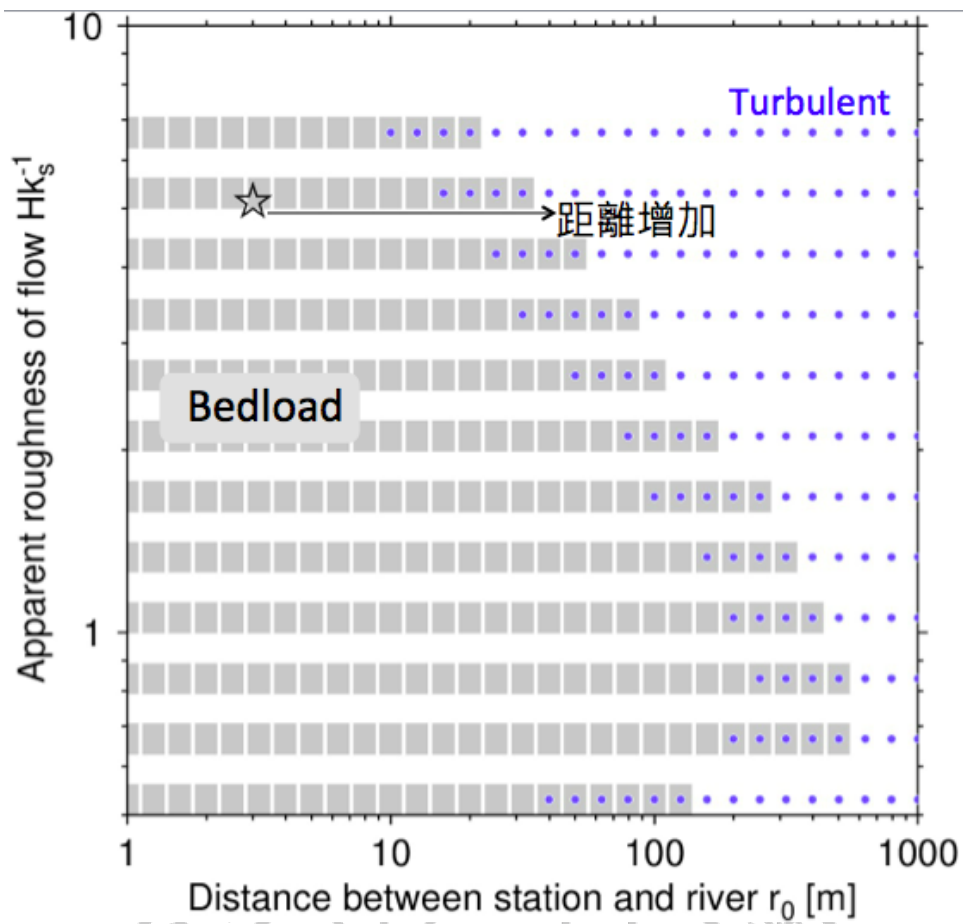


圖 17 震波式物理模型機制分類圖



第四節 室內渠槽試驗成果彙整

本計畫執行 112 年度於 2023 年 11 月 06 日、11 月 09 日及 12 月 20-21 日期間共計完成 21 場試驗，皆已完成相關研究成果分析，但是由於資料數據龐大尚無法進行系統性的歸納。因此，本計畫報告書內容將透過部分案例分為三大部份來進行成果說明：(1)背景噪訊與顆粒撞擊訊號之時頻特性、(2)智能球躍移試驗案例成果及(3)智能球滾動試驗案例成果。

1.背景噪訊與顆粒撞擊訊號之時頻特性

進行室內渠槽試驗進行顆粒運移作用產生之微地動訊號量測最大的挑戰即為釐清環境微地動訊號的來源，特別是水流幫浦馬達運作、蓄水槽的落水作用、渠槽本身結構共振作用及其他可能的人為活動，皆可能產生遠大於泥砂顆粒作用之微地動訊號，因此事先了解上述震動源的訊號時頻特徵為室內試驗的至關重要課題。首先，本計畫在未啟動幫浦馬達運作時，先進行智能球自由放落撞擊試驗，圖 18 顯示主要的環境主頻率集中在 10Hz、20Hz 與兩個頻率範圍 2~8Hz 及 50~60Hz；智能球自由放落高度為 40 公分，此次試驗使用的最大密度的智能球(白色)，可以看出智能球垂直撞擊均勻粒徑底床(20 mm)所產生的時頻特徵為柱狀型，能量主要分佈在大於 10Hz，撞擊之功譜能量皆有大於未開啓幫浦的環境震動訊號。此外，平均頻段之功譜密度時序資料，亦清楚顯示突跳脈衝狀。

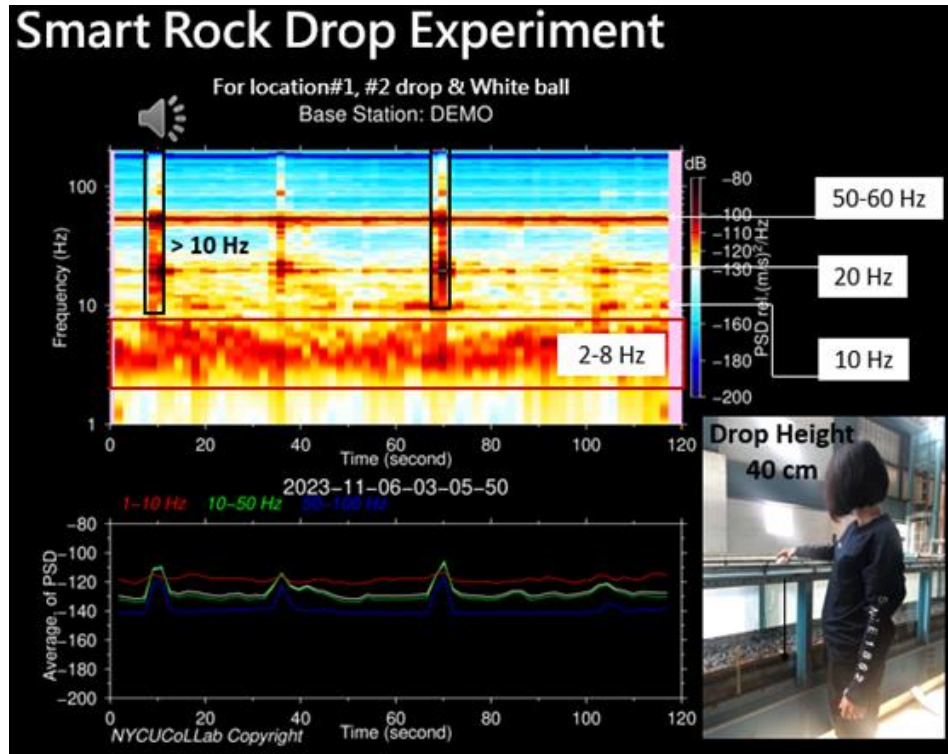


圖 18 自由放落試驗之時頻圖與時序 PSD

第二階段測試，則進行開啓抽水幫浦並觀察微地動訊號在時頻特徵上的變化趨勢。本計畫於 2023 年 11 月 06 日上午 11:30(臺灣時間)開啓幫浦馬達，約 2 分鐘後待渠槽水流流量穩定後，觀察其微地動訊號可以發現，在特定的頻率 80Hz、120Hz 及範圍 8~9Hz 有顯著的功譜能量集中現象，且功譜能量強度幾乎都大於未開始幫浦時期的智能球撞擊底床的訊號，這表示後續在進行分析泥砂顆粒運移產生之微地動訊號需要特別關注在上述頻率範圍以外的區域(圖 19)。本計畫將未開啓、已開啓及未開啓幫浦的自由落放試驗時刻對應之頻譜振幅曲線直接進行比較，圖 20 顯示在未開啓幫浦時，背景及自由落放試驗皆有共同的主頻位置(19.5Hz、53Hz 及 90Hz)，可以推測可能為渠槽結構本身的共振頻率位置；其次，幫浦作用的頻譜強度近乎都大於自由放落試驗的訊號，且顯著的高強度頻譜集中在 8.7Hz 與 120Hz(圖 20)。

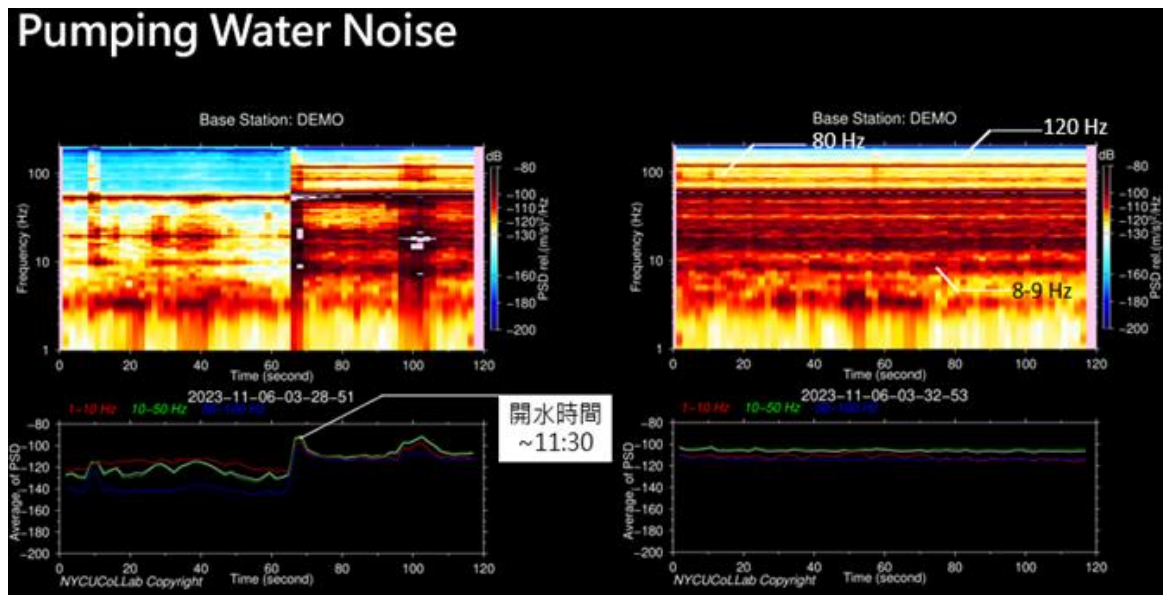


圖 19 幫浦馬達開啓期間的時頻圖

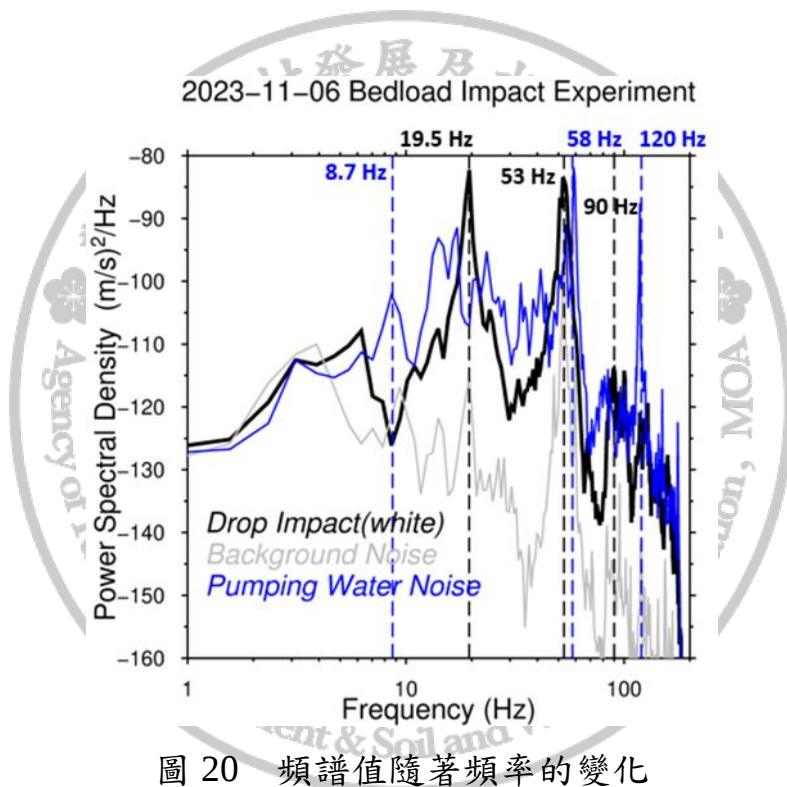


圖 20 頻譜值隨著頻率的變化

(藍色:幫浦、灰色:背景、黑色:撞擊試驗)

2. 智能球躍移試驗案例成果

關於渠槽試驗的條件中，目前智能球三種密度由小至大(紅、黑、

白)主要的運動行為懸浮、跳躍及滾動(皆可由攝影測量影像驗證運動行為)，若以泥砂躍移為主要的試驗案例中，本計畫在此以第六組試驗初步成果進行說明(試驗條件詳見表 1 及表 2)。圖 21 顯示試驗水流條件為在渠槽斷面 1 位置的水深為 11 公分、底床流速為 0.63m/s、表面流速 0.78m/s，利用單一中密度智能黑球於斷面 0 位置自由擲放，觀察其智能球運移行為，且擲放前會用力擺盪智能球以便於讀取加速度資料時進行擲放時間點的同步。此組試驗第一次擲放智能球的時間點約為 16 點 34 分時，圖 21 顯示時頻特徵可以清楚記錄到擲放後的第一下撞擊訊號，主要顯示為柱狀型特徵；而在該撞擊後在時頻圖或特定頻段範圍之平均 PSD 時序資料皆難以判讀後續智能球運移撞擊底床鋪面的微地動訊號。因此，調整頻率段 130~140Hz 進行計算平均 PSD 時序資料，可以稍微觀察到在第一次撞擊後的躍移作用產生之微地動訊號。主要因為在斷面 0 的位置其流速較快且具有自由擲放的重力作用，導致產生之微地動訊號強度可以比幫浦馬達還大。本研究聚焦在第一次的擲放試驗之觀測資料(圖 21 中 0~40 秒)，圖 22 顯示第一次撞擊發生時間約在 10 秒(參考於絕對時間 16:33:50s)，最接近 Geophone 感震器位置(斷面 3 至 4 的中間)的撞擊約發生於 19.5 秒，且於分量 3 的加速度紀錄亦有觀察到瞬時的加速度作用發生(黑色時序資料)，三軸向加速度紀錄亦顯示第一次撞擊發生後 30 秒期間，撞擊加速度時序資料顯示由短週期變化至長週期，代表智能球撞擊頻率越來越慢。此外，進一步假設參考加速度門檻值為 12 m/s^2 ，配合三軸向綜合加速度時序資料，可以判別可能之撞擊次數共計 24 次(如圖 23 白色圓圈)，配合 Hydrophone 功譜密度時頻分析，可以觀察到最接近 Hydrophone 感測器位置(斷面 5 的位置)的撞擊發生於約 21.7 秒，若

配合前述 Geophone 記錄之撞擊時間 19.5 秒，可以計算斷面 3 至 4 中間到斷面 5 的距離為 1.5 公尺，運移時間約為 2.2 秒，可計算智能顆粒運移速度 U_b 約為 0.68 m/s；根據圖圖 23 亦可以判斷最後一次有效撞擊發生的時間點約為 27 秒，上述撞擊次數可以配合攝影畫面進行確認，亦可以透過影像畫面確認躍移行為 L_b 發生的距離約為 7 公尺，因此綜合上述觀測資料可以計算整體躍移時間 t_b 等於 17 秒，配合 L_b 求得平均顆粒運移速度 U_b 為 0.41 m/s。

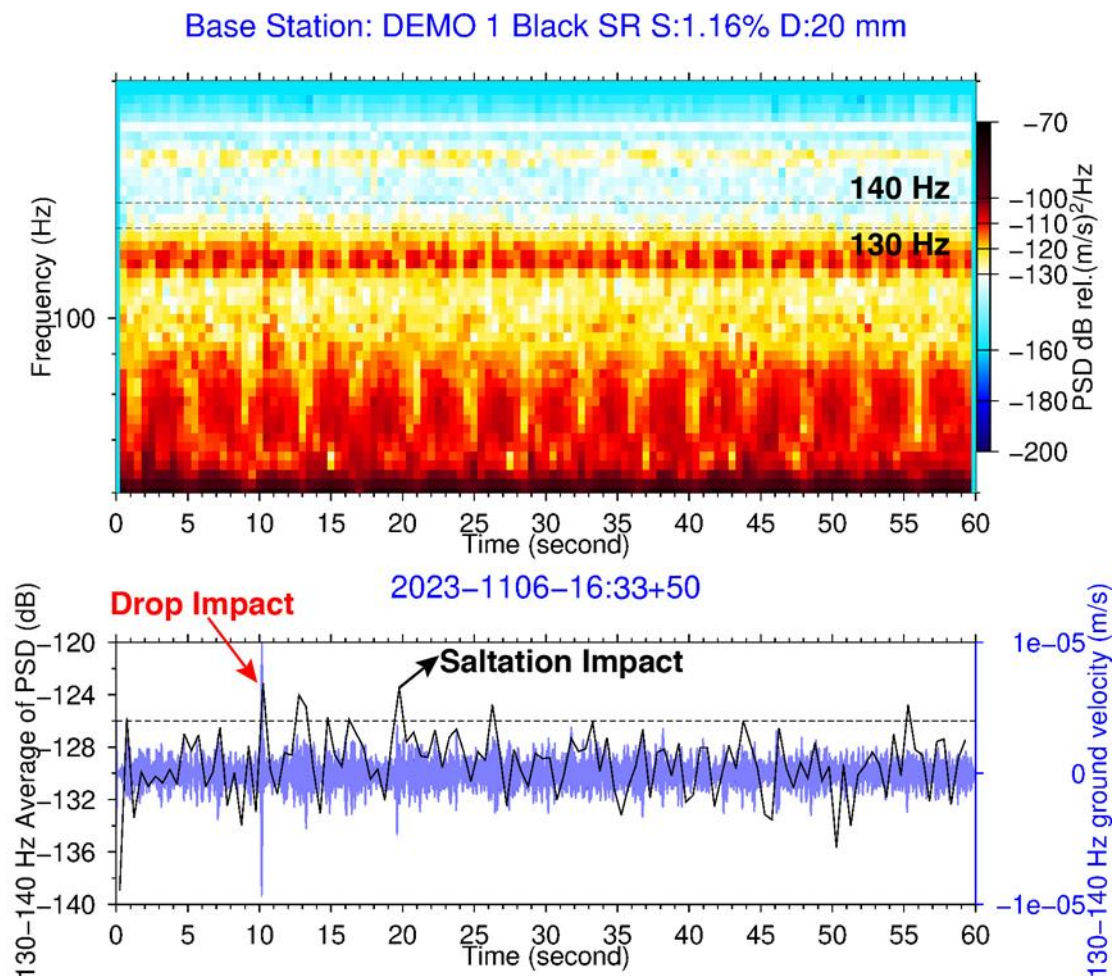


圖 21 第六組試驗之(左)時頻圖、時序地動速度值與平均

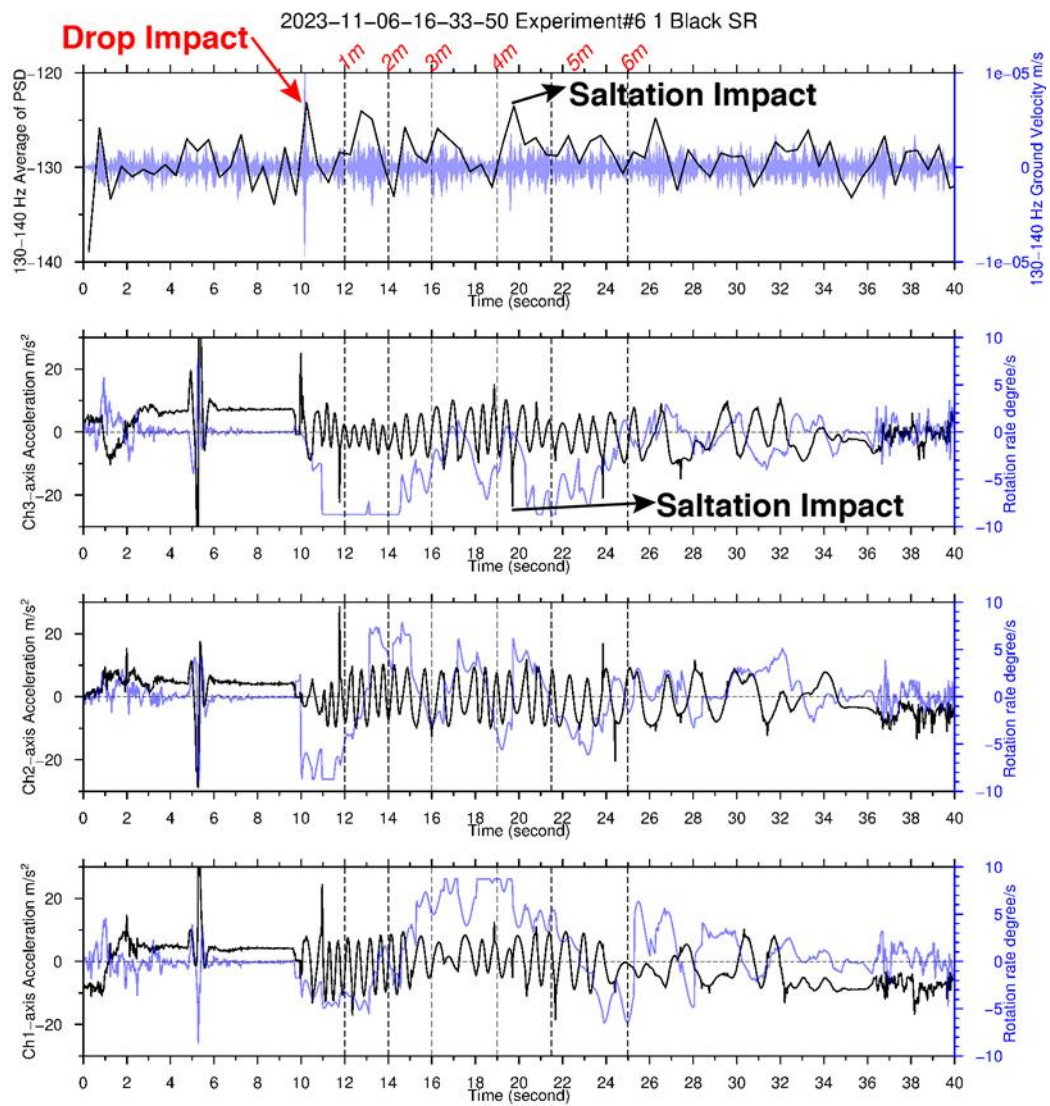


圖 22 第六組試驗之三軸向加速度紀錄(黑色)與角速度資料(藍色)

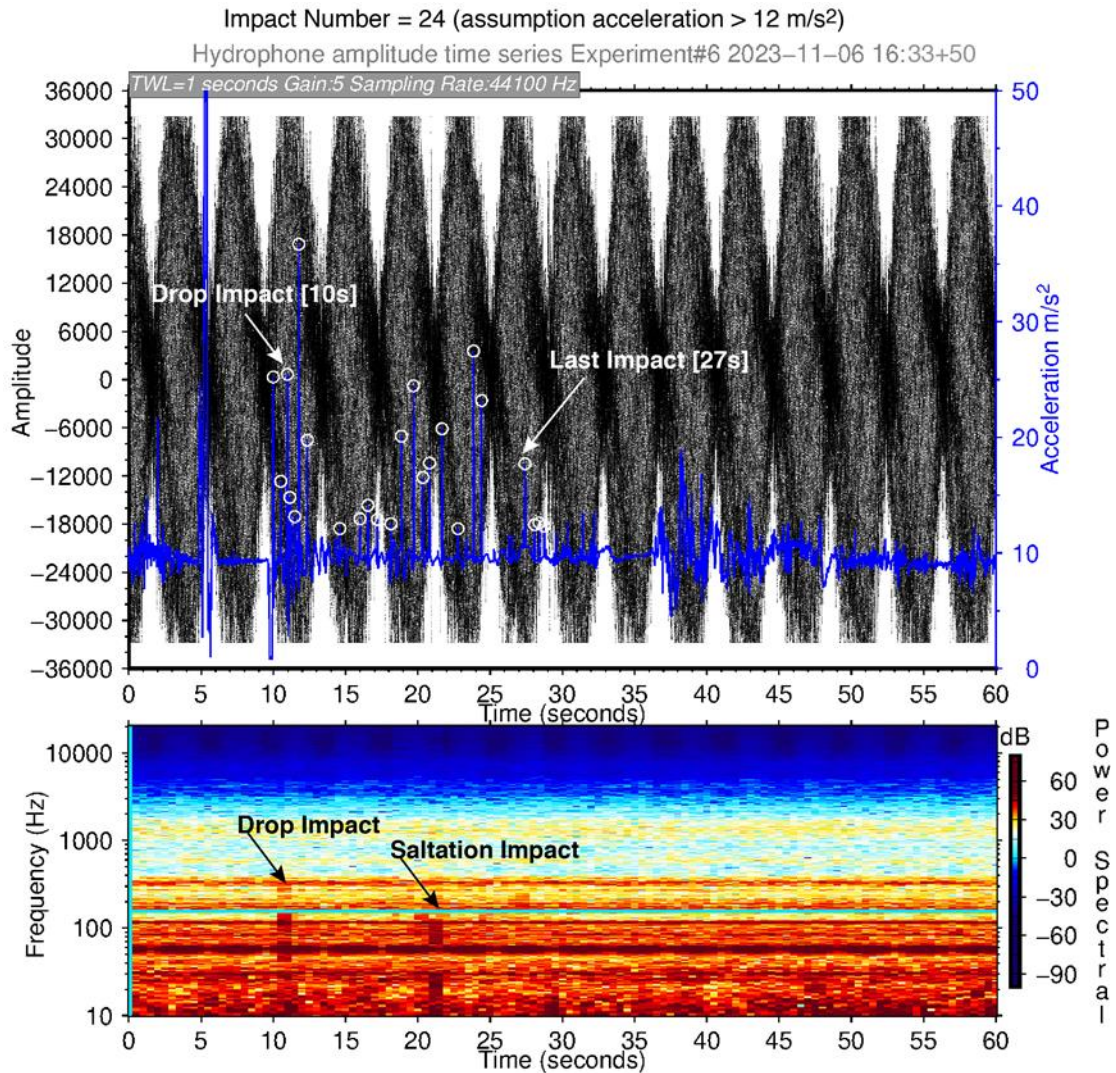


圖 23 第六組試驗之 Hydrophone 時序資料(黑色)及時頻圖與綜合加速度紀錄(藍色)

3.智能球滾動試驗案例成果

本計畫在此以第二十三組試驗智能白球(密度最大)來說明以顆粒滾動行為為主的監測數據成果。圖 24 顯示 Geophone 的時頻分析成果與時序垂直向地動速度資料，此組試驗第一次擲放智能球的時間點約為 13 點 30 分(台灣時間)，參考跳躍行為主要觀察到的頻率區間 130~140 Hz 的 PSD 時序資料，並無顯著 PSD 振幅變化與顆粒運動直

接相關；但是，時頻圖於 46.5 秒的位置(參考時間為 13:29:30s; 亦代表智能球通過 Geophone 的時間點)有顯著的 PSD 能量集中於 60~100 Hz 頻率區間，其代表顆粒滾動造成的 PSD 能量相較於躍移作用集中在低頻的位置。圖 25 則顯示 Hydrophone 的時序資料與時頻突的結果，從 Hydrophone 的時頻圖可觀察到主要的頻譜能量出現在約 50 秒前後(參考時間為 13:29:30s; 亦代表智能球通過 Hydrophone 的時間點)，觀察到的頻譜能量亦集中在小於 100 Hz 的位置。若以智能白球通過 Geophone 感震器時間 46.5 秒至通過 Hydrophone 感測器時間約 50 秒可能滾動作用時間約為 3.5 秒，作用距離為 1.5 公尺(Geophone 與 Hydrophone 之間斷面距離)，其顆粒滾動作用速度為 0.428 m/s，其值皆小於試驗期間斷面 3(0.44 m/s)及斷面 6(0.35)之底床流速。

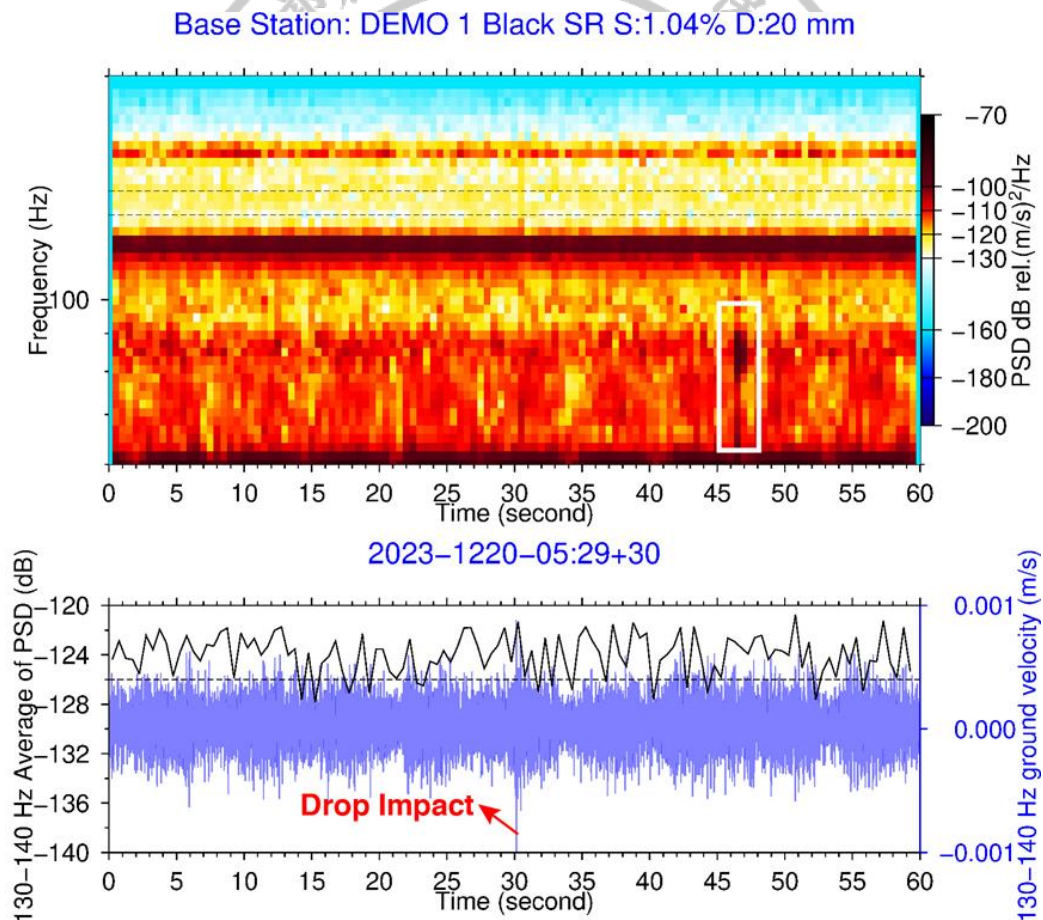


圖 24 第二十三組試驗之時頻圖、時序地動速度值與平均 PSD

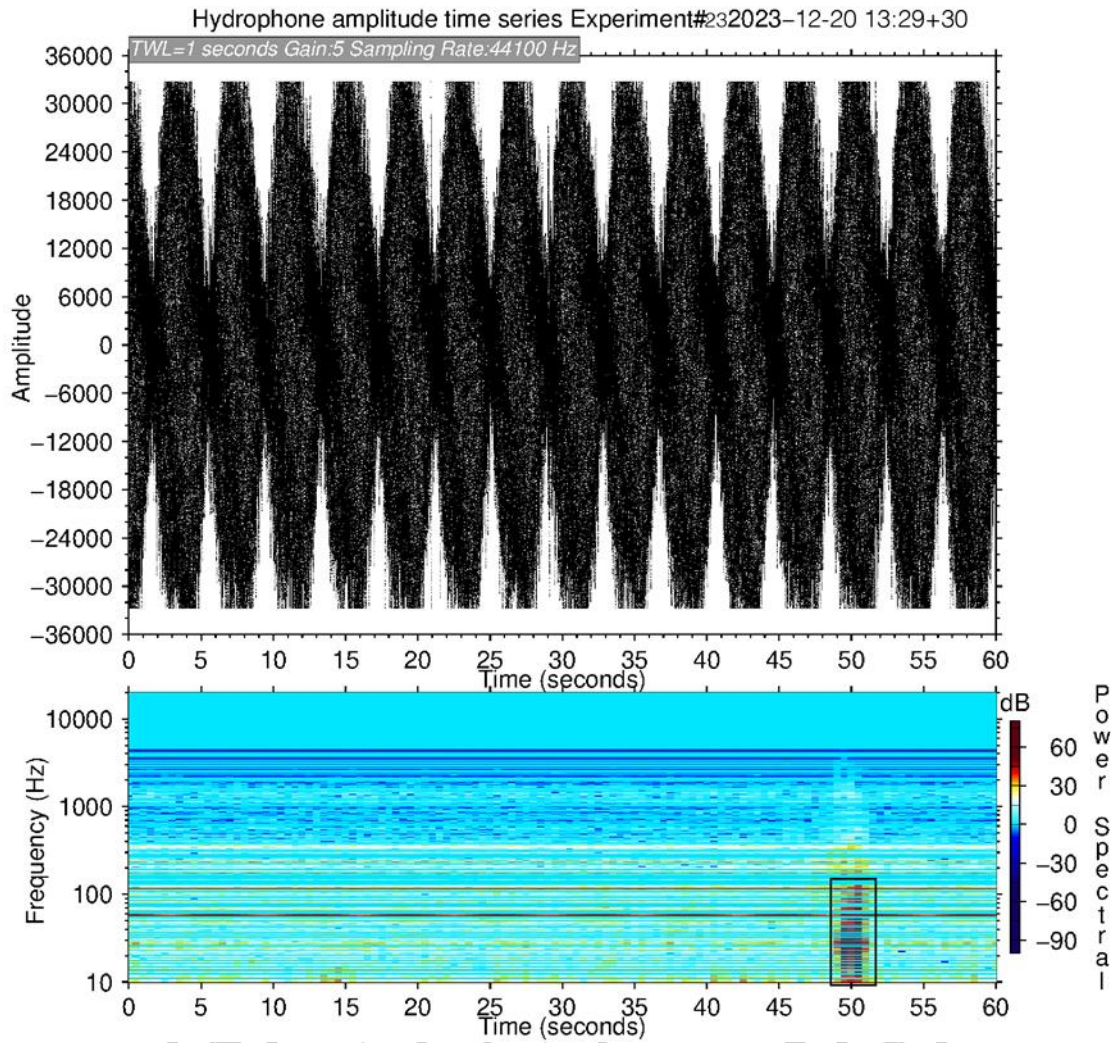


圖 25 第二十三組試驗之 Hydrophone 時序資料(黑色)及時頻圖



第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫交付項目

(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與撞擊作用力時序資料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 、Shield stress)；(4)自行開發現地型手持式粒徑掃描儀應用於試驗場址的表面粒徑調查；(5)USFS 泥砂採樣器提供泥沙總量體，試驗期間進行 1-3 次人工抽換套網；(6)試驗前後正射影像與高程數值模型資料；(7)分散式光纖感測器應用於河床載作用之初探。後續項目(5)~(7)為第二年度規劃野外大型試驗預計執行工項。

期中階段

- 室內渠槽試驗規劃與整備(詳見圖 10)
- 針對室內及野外試驗完成儀器配置，詳見表 3 彙整試驗相關監測、調查與工程施作設備，表中藍色文字代表已於室內渠槽試驗中完成相關測試與率定分析工作，儀器數量欄

位顯示為待定項目則需視計畫明年度執行現地實驗之情況而定，再次進行滾動修正。

- 完成現地實驗水文及地文條件情境之下，震波式躍移模型初探(以 Tsai et al., 2012 垂直躍移模型為例)
- 完成自製式六軸感測之礫石粒子追蹤器、現地型手持式粒徑掃描儀及自製 Stand-alone Hydrophone system
- 完成大型野外試驗場之被動式表面波分析，計算求得剪力波速度構造及相關模型輸入震波參數(模式係數 C_2 與 C_4)

期末階段

- 完成機率式震波躍移物理模型建置(基礎研究)
- 完成渠槽試驗 21 次並彙整相關試驗結果
- 完成智能球加速度時序資料計算相關躍移運動及動力參數分析程序(自製設備之率定測試工作)
- 完成自製 Hydrophone 高取樣率音源檔(wav 格式; 44100 Hz 取樣率)之時序功譜能量分析程序建立、硬體設備測試(放大倍率的調整)。
- 完成大型野外試驗場之主動式震源敲擊試驗求得震波衰減因子隨著頻率的變化特徵(模式係數 C_3 與 C_5)

表 5 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(一)	期中報告書	5 份
2	11 月 13 日(一)	期末報告書	5 份
3	12 月 26 日(二)	成果報告	5 份

資料來源：本計畫





第四章 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。今年度執行成果主要聚焦在建立室內渠槽泥砂躍移觀察試驗，並直接應用本計畫開發之感測器(smart rock、Hydrophone)與即時監測分析程序(網頁伺服器 <http://140.113.21.54/DEMO/DEMO.html>)，透過量測數據直接計算震波物理模型所需參數，以減少參數不確定性對於模式適用性評估的影響。本計畫亦已完成機率式非垂直躍移作用之震波物理模型之建置。根據上述室內實驗數據經驗，明年度將預計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(smart rock 智能球)、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可歸納試驗期間可產生的微地動功譜密度值 PSD 的峰值頻率落在 135 Hz 且 PSD 值介於-101.5 ~ -91.5dB(圖 16)；並由震波物理模型機制分類分析當中，當水深控制在 0.2 公尺，其結果顯示當測站與河心距離增加至 50 公尺以上，則微地動 PSD 值主要將以紊流作用主導。關於六軸感測之礫石粒子追蹤器

(智能球)已近乎完成開發，外殼為直徑 6.5 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。本計畫亦利用 Raspberry Pi 完成自記式地聲計。先規劃以室內渠槽試驗來進行相關感測器(智能球、地聲計及水聲計)於泥砂躍移行為觀察之可行性評估。

在期末階段已完成完成渠槽試驗數次並彙整相關試驗結果，透過實驗數據進行建立智能球加速度時序資料計算相關躍移運動及動力參數分析程序，並納入機率式震波躍移物理模型之構想，於報告書中透過渠槽智能球躍移試驗來建立並說明機率式震波躍移物理模型。針對明年度的野外試驗場址，本計畫亦也完成主動式震源敲擊試驗求得震波衰減因子隨著頻率的變化特徵(模式係數 C_3 與 C_5)。以上經驗將有助於明年度執行野外大型渠道試驗。

第二節 建議

目前已完成試驗中的智能球直徑為 6.5 公分，密度分別為 0.974 g/cm³、1.113 g/cm³、1.252 g/cm³。目前受限於感測器及電池硬體尺寸，無法縮小體積，雖本年度實驗已可觀察到顆粒懸浮、躍移及滾動作用，預計明年度計畫透過改變裝置容器材料，來增加智能球密度。

本計畫期末階段已完成所有感震器、水文量測儀器、泥砂調查技術相關建置，並進行 6 組室內渠槽智能球運移實驗，未來將持續進行多組室內實驗(調整智能球密度、渠道坡度、底床粒徑、單次試驗智能球顆粒數量等)，並會依據室內實驗的規劃來決定大型野外試驗場之泥砂粒徑、流量、河寬尺寸、坡度。

室內渠槽試驗成果(單一智能泥砂顆粒)可以發現泥砂顆粒運動作用造成之微地動訊號容易受到幫浦馬達運作及蓄水槽端的落水作用而影響，未來應將提單次試驗之智能泥砂顆粒數量(本年度試驗中測試最多智能球數量為 6 顆)，以提高所能產生的微地動訊號；或在水流條件允許之下提高智能球密度；抑或混合天然砂及智能球來進行實驗。

室內渠槽(本年度)與現地試驗(明年度)可能存在的差異與預計解決的方法，本計畫將其歸納後條列如下：

- 室內試驗執行時主要皆以 1~3 智能球進行，然而現地實驗時將考

量多顆智能球同時進行，因此必須額外考量顆粒之間的碰撞情境，可能造成的顆粒間磨擦消能的情境。

- 當考慮數量泥砂顆粒及智能球進行現地試驗時，須仰賴本計畫提出的 USFS 掛網式泥砂捕捉器，才能針對震波模式的推移載通量進行率定工作。
- 現地試驗環境將可能難以釐清 total load (wash, suspended, and bedload) 其中單獨來自底床載通量的部分，本計畫提出可於實驗時同時量測懸浮載濃度(實測採樣或光學式)。
- 室內渠槽版本的智能球可能無法直接應用於現地試驗，需測試及強化智能球的防水及外殼強度；其次，現地試驗亦可能無法百分之百回收智能球。
- 本計畫亦提出於現地試驗測試光纖感測器(Silixa iDAS)，該儀器受限於空間解析度(gauge length)，僅能於現地尺度試驗進行測試。

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. Fernandez Luque, F. R., & van Beek, R. (1976) Erosion and transport of bed-load sediment, J. Hydraul. Res., 14, 127-144.
10. 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.
11. 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.
12. 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>.
13. 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).
14. Kamphuis, J. W. (1974) Determination of sand roughness for fixed beds, J. Hydraul. Res., 12, 193-203.
15. Lagarde, S., Dietze, M., Gimbert, F., Laronne, J. B., Tur-owski, J. M., & Halfi, E. (2021) Grain-Size Distribution and Propagation Effects on

- Seismic Signals Generated by Bed- load Transport, *Water Resources Research*, 57, e2020WR028700.
16. 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.
 17. 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>.
 18. 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.
 19. Parker, G. (1990) Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *J. Hydraul. Res.*, 28, 417-436.
 20. Parker, G. (1991) Selective sorting and abrasion of river gravel. ii: Applications, *J. Hydraul. Eng.*, 117, 150-151.
 21. Sambridge, M. (1999) Geophysical inversion with a neighborhood algorithm-I: Searching a parameter space, *Geophysical Journal International*, 138(2), 479 – 494.
 22. 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.
 23. 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.

24. 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.
25. 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.
26. 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。



附錄、計畫內容審查意見及意見回覆

一、計畫書

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	宜先界定研究為針對高含砂水流或土石流，及粒徑分布之影響、不同粒徑在推移過程中將產生擴散(diffuse)現象，而與基質分離，其是否跳躍，與流動狀態有關，故感測器之設定，應先定義量測之流動狀態及土砂模型。	本計畫旨在「利用現地試驗來驗證震波式推移跳躍模型」，因此在實驗配置要以泥砂運移啟動臨界條件進行規劃。然而啟動條件當中如同委員提及的關鍵參數：泥砂粒徑、水文流況將是執行本計畫試驗重要的因素。雖然目前為止已有大量的前人文獻發表來探討不同的流況及土砂物理模型條件下其描述泥砂顆粒運動行為的經驗公式，但是，本研究預計於試驗河道進行初步的實驗來簡易彙整相關現場的泥砂運移行為及流場條

項次	審查意見	回覆辦理情形
		件之關聯性；依據初探的經驗來動態修正相關重要試驗配置，再進行第二次完整的實驗(須在有限的經費條件下盡可能去完成)。其中感測器的物理量測量範圍皆會依據現場試驗條件來進行規劃，其中較為重要的感測器參數為資料點時間取樣率，受限於試驗空間及水砂供應條件限制，試驗整體時間有限，各式感測器皆須有每秒至數秒的取樣率。
二	研究構想是否需要經過室內試驗測試？	感謝委員的意見。相關的試驗重要參數：如泥砂粒徑分布、流況、河道尺寸及坡度皆會參考過去已發表的經驗式來初步規劃。實際上，本研究預計於試驗河道進行初步的實驗

項次	審查意見	回覆辦理情形
		來簡易彙整相關現場的泥砂運移行為及流場條件之關聯性；依據初探的經驗來動態修正相關重要試驗配置，再進行第二次完整的實驗(須在有限的經費條件下盡可能去完成)。
三	不同推移質(尺寸、材料)其特徵訊號是否相同？如不同，如何應用在其他地點？	不同的泥砂及水文條件將微地動訊號特徵，然而，本研究將採用震波式物理模型，其不同於前人研究提出的經驗式或統計率定式，其物理模型在應用上相對仰賴的是現地的參數不確定性，而方法應用上的可攜性較高。因此，本計畫旨在「利用現地試驗來驗證震波式推移跳躍模型」，針對不同的模型參數進行不確定性

項次	審查意見	回覆辦理情形
		分析。

二、期中報告

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	河床泥砂推移質粒徑影響震波分析成果，尤其以土石流之特性，有大顆粒擴散及快速移向前緣之現象，故對於所偵測之標的，宜先加以界定。	感謝委員意見。本計畫已於期末階段完成數組室內渠槽試驗，配合智能泥砂顆粒(smart rock; 三軸加速度計與陀螺儀)、地聲計、水聲計及攝影影像來實際觀察泥砂躍移作用。本計畫直接聚焦討論躍移作用造成的微地動訊號，並釐清不同躍移運動參數經驗式的適用性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	河床粒徑調查，與推移質特性有關，故取樣位置與粒徑分布調查成果有關，可能造成差異。	本計畫在執行野外大型渠道試驗前，會先依據模式評估可能的泥砂運移行為區段，並針對成果來安排河床粒徑調查的主要熱區。
三	粒徑調查以表面粒徑為目標，在擴散作用之推移流動時，對於整體推移質之特性代表性不佳。	感謝委員意見。本計畫將以多點體積法配合影像式表面法之粒徑調查，儘量使粒徑調查成果具有代表性。
四	擬置入礫石之小型感測器，其形狀、勁度及尺寸應與推移質特性相匹配，以利獲得有效益之數據。	本計畫為了釐清石之小型感測器(智能球)之可行性，已規劃室內渠槽試驗來進行評估。目前已完成試驗中的智能球直徑為 6.5 公分，密度分別為 0.974

項次	審查意見	回覆辦理情形
		g/cm³、1.113 g/cm³、1.252 g/cm³。目前受限於感測器及電池硬體尺寸，無法縮小體積，預計明年度計畫透過改變裝置容器材料，來增加智能球密度。
五	圖10 之現地實驗渠槽寬為5m，但P2-12 設置之囚砂網為30x20 cm，尺寸是否匹配，請確認。	感謝委員意見。今年度計畫聚焦於渠槽室內實驗。關於野外大型渠到試驗，針對囚砂網尺寸將會配合水理及渠道地形與幾何條件來進行評估。
六	自製式碰撞感測器外殼為7cm的塑膠球，比重預計要調整到多少才符合推移質之特性，請說明。	目前已完成試驗中的智能球直徑為 6.5 公分，密度分別為 0.974 g/cm³、1.113 g/cm³、1.252 g/cm³。透過渠槽試驗中的水流及坡度

項次	審查意見	回覆辦理情形
		條件，正好可以觀察到懸浮、躍移及滾動行為，目前受限於感測器及電池硬體尺寸，無法縮小體積，預計明年度計畫透過改變裝置容器材料，來增加智能球密度。
七	本試驗主要土砂量測對象為河道輸砂之推移載，其震波推移質模型之適用粒徑範圍請詳細說明。	詳述內容請參考震波模型初探章節內容及報告書中圖 16 及圖 17。
八	承上其適用之流況為何，請詳細說明。	由於泥砂顆粒運動受控於相當多條件控制，因此本計畫今年度執行期間將聚焦在室內渠槽試驗成果，來進行綜合評估相關泥砂顆粒運動對應之水文、地文及底床泥砂粒徑之關聯

項次	審查意見	回覆辦理情形
		性。請詳見期末報告書內容。
九	目前僅完成試驗配置，但所實用之泥砂粒徑、流量、河寬尺寸、坡度等尚未以室內實驗先進行縮尺試驗，此現地條件是否符合過往文獻資料，又能否作為驗證使用，請詳細說明。	根據委員意見，本計畫期末階段已完成所有感震器、水文量測儀器、泥砂調査技術相關建置，並進行6組室內渠槽智能球運移實驗，未來將會依據室內實驗的規劃來決定大型野外試驗場之泥砂粒徑、流量、河寬尺寸、坡度。
十	依震波式物理模型進行現地試驗，其儀器量測之震波頻率能否分離出水流震動、氣泡震動及泥砂震動三者，請補充說明。	進行室內渠槽試驗進行顆粒運移作用產生之微地動訊號量測最大的挑戰即為釐清環境微地動訊號的來源，特別是水流幫浦馬達運作、蓄水槽的落水作用、

項次	審查意見	回覆辦理情形
		渠槽本身結構共振作用及其他可能的人為活動，因此，本計畫同時利用地聲計、水聲計及攝影來進行可能的環境震動源之時頻特徵。委員提及的水流震動、氣泡震動及泥砂運動皆可以透過本計畫規劃之多元感測技術來釐清。
十一	本研究震模型主要需考量現地觀測參數、震波格林函數、泥砂粒徑參數，如無室內實驗進行率定與驗證，目前在現地實驗會否僅為特定流況及泥砂粒徑之參數可用，請詳細說明。	感謝委員意見。本計畫已於期末階段完成數場室內渠槽試驗，透過室內實驗進行相關率定與驗證。另外針對野外渠道試驗場亦已完成現場之地層速度構造及震波衰減品質因子調查，已可以有現地場域之

項次	審查意見	回覆辦理情形
		掌握震波格林函數。
十一	為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載 (https://elibrary.ardswc.gov.tw/)。	期末報告書將更換最新公告範本。

三、期末報告

項次	審查意見	回覆辦理情形
期末報告審查意見：		
一	未來現地實驗時，能否提出與室內實驗之差異？與修正方式？比較方法與關連性？	感謝委員提問。室內渠槽試驗(本年度計畫)執行時可以透過智能球(泥砂顆粒動力及運動參數)、Geophone 及

項次	審查意見	回覆辦理情形
		Hydrophone 時序訊號功譜密度分析與攝影測量(運動軌跡)直接用於驗證震波式推移質跳躍模型，待室內完成模型驗證工作，即時進行現地實驗。實際上現地實驗執行時(明年度計畫)可能面臨以下問題或與室內實驗之差異： • 室內試驗執行時主要皆以 1~3 智能球進行，然而現地實驗時將考量多顆智能球同時進行，因此必須額外考量顆粒之間的碰撞情境，可能造成的顆粒間磨擦消能的情境。 • 當考慮數量泥砂顆粒及智能球進行現地試驗時，

項次	審查意見	回覆辦理情形
		須仰賴本計畫提出的 USFS 掛網式泥砂捕捉器，才能針對震波模式的推移載通量進行率定工作。 • 現地試驗環境將可能難以釐清 total load (wash, suspended, and bedload) 其中單獨來自底床載通量的部分，本計畫提出可於實驗時同時量測懸浮載濃度(實測採樣或光學式)。 • 室內渠槽版本的智能球可能無法直接應用於現地試驗，需測試及強化智能球的防水及外殼強度；其次，現地試驗亦可能無

項次	審查意見	回覆辦理情形
		法百分之百回收智能球。 • 本計畫亦提出於現地試驗測試光纖感測器 (Silixa iDAS)，該儀器受限於空間解析度 (gauge length)，僅能於現地尺度試驗進行測試。 以上條列室內渠槽與現地實驗可能的差異，並且針對問題提出可能的解決方法，預計於明年度計畫執行成果釐清上述相關問題。上述文字內容已新增至期末報告書修訂稿「第三章第二節 建議」。
二	計畫研發之 sensor 是否經過驗證？	本計畫共計研發三種類型儀器：(1)Hydrophone、(2)Smart Rock (智能球)及(3)粒徑掃描儀 (RPiGS-Scanner) 皆已透

項次	審查意見	回覆辦理情形
		過室內槽渠試驗完成相關驗證工作。相關驗證成果以彙整於期末報告書修訂稿中「第二章 第四節 室內槽渠試驗成果彙整」。
三	雖然實用性還有距離，但創新度非常好，期待未來的成果。以往泥砂運多是以隨機分布來考慮，如能監測到撞擊運移，是否能挑戰該隨機模型？	感謝委員的肯定。期末報告書中「第二章 第三節 試驗規劃彙整與震波模型初探」內容中，公式(51)與公式(52)分別代表隨機分佈與機率式之泥砂顆粒撞擊情境對於地動訊號之功譜密度值的關聯性。公式(52)中的撞擊發生之機率密度函數$p_b(t_b)$將可透過本計畫自製開發之Hydrophone、智能球來辨識試驗中有效地撞擊次數與發生時間，計算個別碰撞發生

項次	審查意見	回覆辦理情形
		的間隔時間來估計其機率密度函數。
四	模型之可靠性與穩定性應該加以分析驗證，以確保應用之可信度。	感謝委員的建議。本計畫已於期末報告書「第二章 第三節 試驗規劃彙整與震波模型初探」提出室內渠槽試驗之震波式推移質跳躍模型的驗證流程。如報告書中公式(53)可直接反算試驗中的智能球顆粒數量，其即可直接與真實試驗的顆粒數量進行驗證。然而此驗證分析工作預計於明年度計畫執行前期完成，並提出相關模型驗證成果與模型可能的精進策略，完成上述工項後，將初步嘗試進行現地實驗。本計畫本年度執行重點在於基礎震

項次	審查意見	回覆辦理情形
		波式推移質跳躍模式之開發、完成室內渠槽規劃並進行 21 場試驗、發展及率定相關設備儀器 (Hydrophone、Smart Rock、RPiGS-Scanner)、震波式模型初探與現地實驗規劃。
五	p2-27表1實驗相關配置仍有待定部分與P2-28第7行已完成試驗規劃及整備描述不符，請修正。	本計畫已完成的試驗規劃主要係針對室內渠槽試驗，並已執行 21 場次地渠槽試驗。於期末報告書修訂稿中，表 3 顯示實驗監測、調查與工程施作設備，其中項目顯示為藍色文字為室內槽渠試驗進行相關儀器設備驗證與率定之項目；儀器數量標示為待定則需視計畫明年度執行現地實驗之情況而定。相關文

項次	審查意見	回覆辦理情形
		字補充說明已新增至期末報告書修訂稿。
六	P2-28倒數第3及4行之推移載通量為0.0024及0.00077與表2之0.01不符，請說明。	期末報告書之表 2 中的 q_b 輸入值為 $0.01\text{m}^2/\text{s}$，然而震波物理模型中將考慮水文及泥砂條件(水深、泥砂粒徑)，推估泥砂顆粒運動及動力行為，因此模型預測的推移載通量值僅可能小於或等於 q_b 輸入值，若等於 q_b 輸入值則代表所有的河床質泥砂皆可在模擬情境中進行躍移。相關文字補充說明已新增至期末報告書修訂稿，原先表 2 更改編號為表 4。
七	P2-31圖16中，其於推移載通量0.00077條件下，未有峰值頻率及PSD值，請補充說明。	期末報告書圖 16 分別顯示推移載通量高($0.0024\text{m}^2/\text{s}$)及低($0.00077\text{m}^2/\text{s}$)情境之模型

項次	審查意見	回覆辦理情形
		預測功頻密度曲線成果，其中藍色曲線為紊流作用條件下之結果，並不受不同推移載通量情境影響，因此峰值與 PSD 值僅標示在左圖。在複合作用情境下(黑色曲線)將會受到不同的推移載作用影響(綠色曲線)，因此皆有標示峰值頻率及 PSD 值，且在低推移載通量的情境下之 PSD 值(-101.5dB)顯著小於高推移載通量條件。相關文字說明皆已補充至期末報告書修訂稿。
八	P2-32倒數第7行，「以上模型初探成果將會由期末階段完數場試驗以後進行驗證」，是否已完成？	感謝委員提問。期末報告書原文字描述方式容易造成讀者混淆室內渠槽試驗(本年度)及現地實驗(明年度)之規

項次	審查意見	回覆辦理情形
		劃內容。期末報告書修訂稿已進行相關文字修改與補充說明。
九	P2-32倒數第4行，「以上模型初探成果將會由明年度計畫執行完數場試驗以後進行驗證」，是否符合3-1節計畫交付項目。	同問題項次八答覆。已於期末報告書修訂稿中修飾文字用詞，以釐清室內渠槽試驗(本年度)及現地實驗(明年度)之規劃內容與完成之分析成果。相關 3-1 節計畫交付項目，期中及期末階段成果皆符合「第二章 工作執行與方法步驟」。
十	P2-34第四節，請補充各場次實驗條件、配置及實驗成果，目前報告內僅列第6場實驗成果。	各場次實驗條件、配置已彙整於報告書表 1 及表 2，並新增至期末報告書修訂稿中。本計畫執行 112 年度於 2023 年 11 月 06 日、11 月 09 日及 12 月 20-21 日期間共計

項次	審查意見	回覆辦理情形
		完成 21 場試驗，皆已完成相關研究成果分析，但是由於資料數據龐大尚無法進行系統性的歸納。因此，本計畫報告書內容將透過部分案例分為三大部份來進行成果說明：(1)背景噪訊與顆粒撞擊訊號之時頻特性、(2)智能球躍移試驗案例成果及(3)智能球滾動試驗案例成果。詳見期末報告書修訂稿第二章-第四節「室內渠槽試驗成果彙整」。
十一	p2-34 本計畫為非垂直式撞擊作用之震波躍移模型，採用自由落體測試撞擊功譜是否適於現場濾波使用。此外，採用 40 公分是否合理，亦請	感謝委員提問。智能球丟擲撞擊試驗(自由落體)主要規劃目的為計算實際顆粒運動及力學參數(報告書公式(49))與渠槽設備之路徑響應

項次	審查意見	回覆辦理情形
	補充說明。	(Flume Green's function;公式(50));其次,才是用以釐清與率定試驗期間撞擊地動訊號與背景環境噪訊之時頻特徵差異。試驗下落高度並無絕對數值,僅需要下落高度可產生足夠的地動訊號能量即可。詳細說明可參考期末報告書修訂稿第二章-第三節「試驗規劃彙整與震波模型初探」。
十二	P2-36相關量測斷面位置請補充圖說。	相關斷面說明如期末報告書修訂稿中圖 10 所示。
十三	P4-1第7行,本計畫已完成機率式非垂直躍移作用之震波物理模型建置,其模型之力學及運動參數請補充說明。	詳細說明可參考期末報告書修訂稿第二章-第三節「試驗規劃彙整與震波模型初探」。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十四	P4-3第3行，「本年度實驗已可觀察到顆粒懸浮、躍移及滾動作用」，未見於報告書內，請補充說明。	感謝委員建議，除了智能顆粒(紅色)懸浮行為無法直接產生地動訊號以外，其餘躍移及滾動作用之室內試驗成果分析皆已完成補充說明。 詳見期末報告書修訂稿第二章-第四節「室內渠槽試驗成果彙整」。

