計畫編號：SWCB-107-134

# 集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)
# The sediment runoff in catchment area observationl system establishment and study (2 of 2)

執 行 單 位：財團法人成大研究發展基金會

執 行 時 間：107 年 1 月 31 日至 107 年 12 月 15 日

計畫主持人 ：臧運忠 博士

共同主持人 ：李心平 博士、陳俞旭 博士

**行政院農業委員會水土保持局 編印**

**中華民國 107 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）

# 集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究（2/2）


## 摘要

本計畫於高雄市甲仙區油礦溪集水區應用前期建置日本管式水聲計，監測底床載輸砂量，成功蒐集 3 場事件期間底床載連續資料，分別為 0619 豪雨、0702 豪雨、0823 熱帶低壓，河道土砂流出監測示範站於事件期間已可取得連續之監測資料，所收集底床載輸砂量具代表性，可作為上下游治理之參考，持續蒐集監測數據增加其可靠性，後續亦可作為模擬之驗證資料。

常見底床載推估公式 Meyer-Peter˙Müller 式所推估之底床載輸砂量，與水聲計推估土砂量進行比較，顯示低於 Meyer-Peter˙Müller 式。

今年度於現地加設囚砂箱與自動秤重系統，未來遭遇強降雨事件，將可配合水聲計紀錄，進行事件輸砂量觀測，並完善輸砂關係式。

室內實驗部分，今年度嘗試建立土砂流出推估量的修正式，初步測試利用推估量與實際量的差異比較無因次剪應力之關係，透過不同流況下之無因次剪應力與推算量之差異進行修正，初步結果可修正推估量結果至接近實際量，未來試驗多組流況後，可應用至現地做推估量修正。



**關鍵詞：底床載、土砂監測、水聲計**

# The sediment runoff in catchment observationl system establishment and study （2 of 2）


## Abstract

The plan use that established the Japanese pipe hydrophone in the Jia-xian district You-Kuang river catchment at earlier plan to observation the bedload transport. We success collection 3 event data for 1 June rains, 13 June rains, and 23 August tropical depression. The observation station can collection the continuously monitor data. It can take reference to the upstream and downstream governance. And continues collection monitor data to increase its reliability, following also may take confirmation material for simulation.

The common bedload estimated formula Meyer-Peter˙Müller formula, The bedload transport estimated by hydrophone is lower than the Meyer-Peter˙Müller formula quantity.

This year, setting a sediment trap and the automatic weighing system in field. In the future, when meet the strong rainfall event. It can be connected to the hydrophone data, analysis the sediment runoff and improve the sediment runoff reletion formula.

In laboratory test, this year tried to found a modifing formula. In the experiment, use the establishment discharge and actually discharge to compare the dimensionless shear stress. By different flow conditions, which use the difference of establishment discharge and actually discharge with the dimensionless shear stress, the relationship to modify the establishment discharge. The result can close the actually discharge. In the future, after experiment more flow conditions, it can be use to modify the establishment discharge in field.



**Keywords：Bedload、Sediment monitoring、Hydrophone**

# 目次

**摘要 ..... I**

**Abstract ..... II**

**目次 ..... IV**

**表次 ..... VI**

**圖次 ..... VIII**

**第一章　前言 ..... 1-1**

第一節　計畫緣起與目的 ..... 1-1

第二節　計畫區域 ..... 1-2

第三節　計畫工作項目 ..... 1-3

第四節　工作架構 ..... 1-6

**第二章　前期計畫成果 ..... 2-1**

第一節　105 年計畫成果 ..... 2-1

第二節　106 年計畫成果 ..... 2-9

**第三章　現地監測儀器之維護與保養 ..... 3-1**

第一節　現地監測儀器之配置 ..... 3-1

第二節　儀器之維護與保養方法 ..... 3-3

第三節　年度儀器維護與保養 ..... 3-16

**第四章　河道底床載監測示範站之補強與改善 ..... 4-1**

第一節　106 年度遭遇問題 ..... 4-1

第二節　補強與改善措施 ..... 4-4

**第五章　設置河道底床載直接式量測裝置 ..... 5-1**

第一節　直接式量測裝置評估 ..... 5-1

第三節　自動秤重系統設置 ..... 5-20

第四節　事件後檢修與清理 ..... 5-27

**第六章　河道底床載量測現地實驗 ..... 6-1**

第一節　現地河床質採樣與特性分析 ..... 6-1
第二節　河道底床載量測現地試驗-USFS 採樣設備 ..... 6-5
第三節　河道底床載量測現地試驗-水聲計配合囚砂箱試驗 ..... 6-11
**第七章　水聲計室內水槽試驗 ..... 7-1**
第一節　實驗設備介紹 ..... 7-1
第二節　河道底床載量測室內試驗說明及規劃 ..... 7-6
第三節　試驗資料收集與成果分析 ..... 7-22
**第八章　現地監測成果綜合分析 ..... 8-1**
第一節　現地監測資料分析 ..... 8-1
第二節　室內試驗與現地試驗及現地監測成果分析 ..... 8-11
**第九章　河道底床載監測後續建議及應用 ..... 9-1**
第一節　監測技術應用限制與檢討 ..... 9-2
第二節　監測站設置評估 ..... 9-7
第三節　後續應用與建議 ..... 9-10
**第十章　結論與建議 ..... 10-1**
第一節　結論 ..... 10-1
第二節　建議 ..... 10-2
**參考文獻 ..... 參-1**

**附錄**

附錄一、土砂流出量監測儀器規格表
附錄二、現地維護紀錄表
附錄三、每日遠端檢查紀錄表
附錄四、水土保持局現有土砂觀測站
附錄五、期初審查意見及回覆
附錄六、期中審查意見及回覆
附錄七、期末審查意見及回覆

# 表次


表 1-1 進度檢核表 ..... 8

表 2-1 河道底床載土砂流出量監測示範站設備一覽表 ..... 2-7

表 2-2 Meyer-Peter˙Müller 式計算參數 ..... 2-11

表 2-3 何智武式計算參數 ..... 2-11

表 2-4 吳益裕式計算參數 ..... 2-11

表 2-5 106 年度現地監測成果推算土砂運輸量 ..... 2-12

表 3-1 定期維護檢測項目表 ..... 3-5

表 3-2 監測系統現地維護檢測表 ..... 3-6

表 3-3 監測系統遠端檢查表 ..... 3-11

表 3-4 監測系統維運異常處理告知單 ..... 3-14

表 3-5 現地維護時間 ..... 3-16

表 5-1 壓差式底床載量測設備基本資料表 ..... 5-3

表 5-2 籃式底床載量測設備基本資料表 ..... 5-6

表 5-3 槽坑式底床載囚砂箱基本資料表 ..... 5-11

表 6-1 106 年河床質採樣基本資料表 ..... 6-1

表 6-2 河床值特徵粒徑比較表 ..... 6-4

表 6-3 USFS 式採樣設備囚砂試驗紀錄表(107/07/13) ..... 6-5

表 6-4 USFS 式採樣設備囚砂試驗紀錄表(107/07/23) ..... 6-8

表 6-5 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣水聲計撞擊次數與囚砂重 ..... 6-9

表 6-6 各放大倍率之趨勢線公式以及決定係數 ..... 6-18

表 6-7 現地試驗遭遇問題與改善方法 ..... 6-19

表 7-1 水聲計底床載推估方法簡表 ..... 7-6

表 7-2 流速 1.9m/s 條件下不同放大倍率粒徑門檻值 ..... 7-8

表 7-3 不同推估方式對輸砂率之差異試驗條件 ..... 7-16

表 7-4 室內水聲計渠道試驗情境簡表 ..... 7-17

表 7-5　不同放大倍率及不同土砂粒徑之偵測率.....7-24
表 7-6　試驗坡度與相對流速.....7-29
表 8-1　107 年度水土保持局台南分局災害應變中心開設時間.....8-1
表 8-2　各倍率趨勢線公式與相關性.....8-11
表 8-3　Meyer-Peter˙Müller 式計算參數與結果.....8-13
表 8-4　0619 豪雨-水聲計輸砂量與 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量比較.....8-15
表 8-5　0702 豪雨-水聲計輸砂量與 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量比較.....8-17
表 9-1　監測計畫規劃表（前期成果）.....9-1
表 9-2　不同倍率觸發粒徑偵測率.....9-3
表 9-3　輸砂量推估方法比較.....9-6
表 9-4　水保局現有土砂測站評估.....9-9

# 圖次


圖 1-1 土砂流出量監測示範站設置點位 ..... 1-2

圖 1-2 工作執行架構圖 ..... 1-6

圖 1-3 計畫執行進度甘梯圖 ..... 1-7

圖 2-1 河道輸砂監測原理、感測器與適用範圍 ..... 2-2

圖 2-2 管式水聲計組成示意圖 ..... 2-2

圖 2-3 管式水聲計設置架構 ..... 2-3

圖 2-4 土砂顆粒撞擊管式水聲計示意圖 ..... 2-4

圖 2-5 水聲計三種不同方向聲波示意圖 ..... 2-4

圖 2-6 聲波轉換示意圖 ..... 2-4

圖 2-7 河道底床載土砂流出量監測示範站設置行政位置圖 ..... 2-5

圖 2-8 105 年度觀測系統儀器配置示意圖 ..... 2-6

圖 2-9 構造物設備安裝一覽圖 ..... 2-7

圖 2-10 儀器小屋設備安裝一覽圖 ..... 2-8

圖 2-11 106 年度觀測系統儀器配置示意圖 ..... 2-9

圖 2-12 106 年度尼莎颱風與海棠颱風後水聲計金屬管凹陷 ..... 2-10

圖 2-13 106 年度尼莎颱風與海棠颱風水位及流速監測成果 ..... 2-10

圖 2-14 106 年度現地試驗完成之水聲計撞擊次數與輸砂量關係曲線 ..... 2-11

圖 2-15 土砂顆粒撞擊水聲計之音壓與動量關係 ..... 2-12

圖 2-16 106 年 0613 豪雨-水聲計撞擊次數（每分鐘） ..... 2-13

圖 3-1 河道底床載土砂流出量監測示範站設置行政位置圖 ..... 3-1

圖 3-2 河道土砂流出監測示範站儀器配置圖 ..... 3-2

圖 3-3 現地監測儀器維護流程圖 ..... 3-3

圖 3-4 管式水聲計鋼管水垢清理（107 年 4 月 24 日） ..... 3-7

圖 3-5 水位計感測端沾黏土砂之情況（106 年 5 月 24 日） ..... 3-7

圖 3-6 水位計置入已知水深之水瓶進行檢測（107 年 1 月 30 日） ..... 3-7

圖 3-7 水位計與濁度計感測端（107 年 7 月 23 日）.....3-8
圖 3-8 濁度計利用濁水與清水進行檢測（107 年 7 月 10 日）.....3-8
圖 3-9 流速計表層清理（107 年 4 月 24 日）.....3-8
圖 3-10 旋槳式流速計量測示意圖（107 年 3 月 23 日）.....3-9
圖 3-11 監測系統記錄格式.....3-10
圖 3-12 管式水聲計檢測校正：(a)現地測試示意圖 (b)室內測試趨勢線圖.....
.....3-12
圖 3-13 水位計率定紀錄.....3-12
圖 3-14 濁度計率定紀錄.....3-13
圖 3-15 107/9/11 異常通報單.....3-15
圖 3-16 107 年度維護與降雨事件時間軸.....3-17
圖 3-17 水聲計金屬管表面清理前後照片（107/2/27）.....3-18
圖 3-18 清理水位計、濁度計保護管內淤積土砂（107/7/10）.....3-18
圖 4-1 水聲計金屬管凹陷情形（106/8/16）.....4-1
圖 4-2 不同時期慈恩橋上游土砂堆積情形（資料來源：前期計畫、GOOGLE
道路街景）.....4-2
圖 4-3 鍍鋅鐵管事件後外觀鏽蝕情況.....4-3
圖 4-4 不同厚度金屬管示意圖.....4-4
圖 4-5 7.5mm 厚金屬管之管式水聲計裝設後照片.....4-5
圖 4-6 7.5mm 厚金屬管之管式水聲計 107 年度汛期前後狀況.....4-5
圖 4-7 河道左岸加設水位計(107/5/3).....4-6
圖 4-8 0613 豪雨-右岸水位計與左岸水位計之比較.....4-7
圖 4-9 傳輸線路保護管更換為不鏽鋼管後(107/9/11).....4-8
圖 5-1 底床載採樣器主要概念設計圖.....5-3
圖 5-2 Helley-Smith 底床推移載採樣器.....5-4
圖 5-3 Canada 礫石型底床推移載採樣器.....5-4
圖 5-4 Koblenz 底床推移載採樣器.....5-4

圖 5-5 MÜHLHOFER 底床推移載採樣器 ..... 5-5
圖 5-6 AYT 型底床推移載採樣器 ..... 5-5
圖 5-7 可移動籃式量測設備(Rickenmann et al., 2010) ..... 5-7
圖 5-8 美國農業部溪流科技中心 USFS 型採樣器 ..... 5-8
圖 5-9 改良式籃式量測設備（許少華，99 年） ..... 5-9
圖 5-10 底床載囚砂箱主要概念設計圖 ..... 5-12
圖 5-11 以色列全斷面囚砂箱試驗（Bergman 等人,2007） ..... 5-12
圖 5-12 日本穗高觀測所囚砂箱外觀與挖取土砂 ..... 5-13
圖 5-13 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體設計俯視圖 ..... 5-15
圖 5-14 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體設計側視圖 ..... 5-16
圖 5-15 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體設計前視圖 ..... 5-16
圖 5-16 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體下游活動閘門設計前視圖 ..... 5-17
圖 5-17 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體金屬保護板配置設計俯視圖 ..... 5-17
圖 5-18 施工導水及圍水後現場狀況 ..... 5-18
圖 5-19 囚砂箱體底座植筋與鋼筋結構作業 ..... 5-18
圖 5-20 囚砂箱牆面結構施工 ..... 5-19
圖 5-21 囚砂箱鋼筋水泥構造完成 ..... 5-19
圖 5-22 頂部金屬保護板及下游活動閘門裝設 ..... 5-19
圖 5-23 秤重系統載重試驗 ..... 5-20
圖 5-24 秤重系統載重試驗結果紀錄 ..... 5-21
圖 5-25 秤重系統水中試驗-水位變化與測重試驗 ..... 5-21
圖 5-26 秤重系統水中試驗-浸水過程重量變化 ..... 5-22
圖 5-27 秤重系統水中試驗-重量分布之影響 ..... 5-23
圖 5-28 秤重系統水中試驗-角落偏重之影響 ..... 5-23
圖 5-29 秤重系統水中試驗紀錄結果 ..... 5-24

圖 5-30 秤重系統水中試驗-水下耐久性 .....5-25
圖 5-31 自動秤重系統裝設水平確認.....5-26
圖 5-32 加裝橡膠墊緩衝土石顆粒撞擊及防止細沙灌入下層 .....5-26
圖 5-33 囚砂箱清理現場進行圍水及導水.....5-27
圖 5-34 囚砂箱內部清理表層可見細泥與礫石.....5-28
圖 5-35 囚砂箱內部上層土砂清理.....5-28
圖 5-36 囚砂箱內部中層土砂清理.....5-29
圖 5-37 囚砂箱內部土砂清理完成.....5-29
圖 5-38 0619 豪雨事件後囚砂坑篩分析.....5-30
圖 5-39 0702 豪雨後囚砂坑篩分析.....5-31
圖 6-1 河床質採樣位置分佈圖.....6-2
圖 6-2 河床質採樣工作照片(一號孔).....6-3
圖 6-3 河床質採樣工作照片（二號孔）.....6-3
圖 6-4 107 年河床值粒徑分析成果(107 年一號孔).....6-3
圖 6-5 107 年河床值粒徑分析成果(107 年二號孔).....6-4
圖 6-6 USFS 式採樣設備現場設置照片（107.7.13）.....6-6
圖 6-7 USFS 式採樣設備運作情形（面向下游）(107.7.13）.....6-6
圖 6-8 USFS 式採樣設備運作情形（面向上游）(107.7.13）.....6-7
圖 6-9 現場囚砂網收錄情形（107.7.13）.....6-7
圖 6-10 USFS 式採樣設備現場設置照片（107.7.13）.....6-8
圖 6-11 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣篩分析.....6-9
圖 6-12 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣設備設置.....6-10
圖 6-13 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣設備收集結果.....6-10
圖 6-14 現地實驗流程圖.....6-12
圖 6-15 撞擊次數與輸砂量關係示意圖.....6-12
圖 6-16 撞擊次數與囚砂重關係圖（前期成果） .....6-13
圖 6-17 現地試驗渠道設置（107/11/3）.....6-14

圖 6-18 渠道下游 1.3 公尺寬（107/11/3） .....6-15
圖 6-19 於水聲計上游 3 公尺處供砂（107/11/3） .....6-15
圖 6-20 現地試驗後箱內土砂堆積狀況 .....6-16
圖 6-21 107/11/03 現地試驗篩分析成果 .....6-17
圖 6-22 現地試驗每 5 分鐘水聲計撞擊次數對每 5 分鐘重量變化紀錄 .....6-17
圖 6-23 現地試驗水聲計撞擊次數對重量變化紀錄(前期人工囚砂).....6-18
圖 7-1 室內實驗所使用之管式水聲計 .....7-1
圖 7-2 訊號擷取卡 USB-4716 .....7-2
圖 7-3 單一顆粒撞擊試驗實驗架：45 度斜坡及垂直落下平面示意圖 .....7-2
圖 7-4 室內實驗水槽.....7-3
圖 7-5 坡度調整裝置與流量控制閥門 .....7-3
圖 7-6 定水頭水箱.....7-3
圖 7-7 水位針尺(ME-1).....7-4
圖 7-8 流速計(Flowatch) .....7-4
圖 7-9 攝影設備(OM-D EM-5).....7-5
圖 7-10 日本撞擊次數與輸砂量關係示意圖(日本工営株式會社，2016) .....7-7
圖 7-11 不同放大倍率下撞擊次數計算示意圖.....7-8
圖 7-12 音壓與動量推估輸砂量流程圖 .....7-9
圖 7-13 音壓與動量關係示意圖.....7-10
圖 7-14 土砂粒徑推估示意圖(日本工営株式會社，2016).....7-10
圖 7-15 粒徑分布推估示意圖(日本工営株式會社，2016).....7-12
圖 7-16 單一顆粒敲擊試驗流程圖.....7-14
圖 7-17 單一顆粒撞擊試驗：45 度斜坡及垂直落下示意圖 .....7-14
圖 7-18 3mm 管厚水聲計音壓與動量關係.....7-15
圖 7-19 不同放大倍率與土砂粒徑對門檻值之差異示意圖 .....7-16
圖 7-20 實驗水槽配置圖.....7-18
圖 7-21 室內水槽試驗流程圖.....7-19

圖 7-22 渠道內利用 U 形環及橡膠墊片固定水聲計.....7-20
圖 7-23 水槽內鋪設木板現況.....7-20
圖 7-24 水聲計上下設置緩坡.....7-20
圖 7-25 3mm、7.5mm 管厚水聲計音壓動量關係比較圖.....7-22
圖 7-26 室內渠道音壓動量率定成果.....7-23
圖 7-27 室內渠道水聲計斜坡落下測試.....7-23
圖 7-28 不同放大倍率及不同土砂粒徑之偵測率.....7-24
圖 7-29 不同推估方式之輸砂量推估與實際值關係.....7-25
圖 7-30 不同無因次剪應力下之顆粒數偵測差異.....7-26
圖 7-31 不同倍率撞擊次數推估結果修正.....7-26
圖 7-32 音壓動量曲線對於顆粒大小之偵測.....7-27
圖 7-33 不同無因次剪應力下之輸砂量偵測差異.....7-27
圖 7-34 不同推估方式之推估結果修正.....7-28
圖 7-35 10 mm 顆粒偵測率試驗成果.....7-30
圖 7-36 20 mm 顆粒偵測率試驗成果.....7-30
圖 7-37 30 mm 顆粒偵測率試驗成果.....7-31
圖 7-38 10 mm 顆粒輸砂量試驗成果.....7-32
圖 7-39 20 mm 顆粒輸砂量試驗成果.....7-33
圖 7-40 20 mm 顆粒輸砂量試驗成果.....7-33
圖 8-1 0613 豪雨-水聲計撞擊次數及左、右岸水位計與時雨量紀錄.....8-2
圖 8-2 0613 豪雨-底床流速計及左、右岸水位計與時雨量紀錄.....8-2
圖 8-3 0613 豪雨-濁度計及左、右岸水位計與時雨量紀錄.....8-2
圖 8-4 0619 豪雨-水聲計撞擊次數及左岸水位計與時雨量紀錄.....8-3
圖 8-5 0619 豪雨-底床流速計及左岸水位計與時雨量紀錄.....8-4
圖 8-6 0619 豪雨-濁度計及左岸水位計與時雨量紀錄.....8-4
圖 8-7 0702 豪雨-水聲計撞擊次數及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-6
圖 8-8 0702 底床流速計及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-6

圖 8-9 0702 豪雨-濁度計及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-6
圖 8-10 0823 熱帶低壓-水聲計撞擊次數及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-7
圖 8-11 0823 熱帶低壓-底床流速計及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-8
圖 8-12 0823 熱帶低壓-濁度計及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-8
圖 8-13 山竹颱風-水聲計撞擊次數及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-9
圖 8-14 山竹颱風-濁度計及右岸水位計與時雨量紀錄.....8-10
圖 8-15 撞擊次數與輸砂量推算土砂量關係圖（107/11/03 試驗成果）.....8-11
圖 8-16 日本撞擊次數與輸砂量關係示意圖(日本工営株式會社，2016) ...8-12
圖 8-17 0619 豪雨-水聲計推估輸砂量與水位及時雨量關係.....8-14
圖 8-18 0619 豪雨-水聲計輸砂量與 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量比較 ....8-15
圖 8-19 0702 豪雨-水聲計推估輸砂量與水位及時雨量關係.....8-16
圖 8-20 0702 豪雨-水聲計輸砂量與 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量比較 ....8-17
圖 9-1 64 被放大倍率之撞擊次數與重量變化關係 .....9-2
圖 9-2 音壓動量曲線線性區域示意圖 .....9-3
圖 9-3 音壓動量關係曲線線性區域外示意圖 .....9-5
圖 9-4 日本土砂監測站位置分佈圖 .....9-7
圖 9-5 常願寺川 2015 年 4 月 3 日事件囚砂箱內土砂粒徑分布曲線（日本工營株式會社，2016）.....9-11
圖 9-6 常願寺川 2015 年 4 月 3 日事件水聲計推估土砂粒徑分布曲線（日本工營株式會社，2016）.....9-12
圖 9-7 常願寺川本宮砂防堰堤流量與輸砂量比較(日本工營株式會社,2016）.....9-12

# 第一章　前言

## 第一節　計畫緣起與目的

河道土砂流出量（sediment runoff in river channel）為河川中所移動通過之總輸砂量，依據土砂運動與粒料特性，主要可分為懸浮載(suspended load)，以及底床載（bed load）[1]，懸浮載為懸浮於水中之土砂顆粒所組成，通常粒徑較小，底床載為接近底床高度受水流以滾動、滑動，或躍動之土砂顆粒。

臺灣土砂監測現況主要以利用採樣器或濁度計，取得河川隨時間變化之懸浮載土砂濃度，因缺乏底床載之觀測數據，經常使用之方法為利用已知土砂濃度乘上固定比例[2]，藉此推測總土砂運移量，依據美國地質調查局（USGS）底床載與懸浮載之觀測資料，推測底床載與實際底床載之間存在相當程度差距。

目前臺灣野溪底床載輸砂量多採經驗公式或懸浮載輸砂量的固定比例進行推估，且於颱洪期間難以進行底床載輸砂量之量測，缺乏現地數據驗證，進而影響集水區河道土砂流出量評估。前期計畫(105~106 年)已引入日本管式水聲計並建置監測示範站，透過現地觀測、現地試驗初及室內水槽實驗初步建立底床載輸砂量與泥砂撞擊次數之關係，並透過人工供砂及囚砂試驗完成現地中、低流量的率定驗證。本研究持續進行現地監測站之維運以獲取更充足的現地監測資料，並針對監測設備之耐受能力進行改善及補強。另考量颱洪事件(高流量)期間缺乏現地實測驗證資料，今年度擬建置囚砂箱(sediment trap)等底床載直接式量測設備以取得高流量期間之底床載輸砂量資料，獲取更完整的現地觀測與驗證數據，深入探討囚砂箱等直接式觀測設備與水聲計(間接式)作為推估底床載輸砂量之合理性及應用性，作為後續推動集水區河道土砂流出量定量量測與評估之參考。

1.土砂運移常見分類有 1.三分法：清洗載、懸浮載、底床載；2.二分法：懸浮載、底床載，在此皆使用二分法中定義。

2.常見土砂運移量推算方法（固定比例法） 所測得沖洗載或懸浮載 x 10/3 =土砂運移量。

## 第二節　計畫區域

前期計畫於 105 年在**高雄市甲仙區油礦溪**建立一土砂底床載流出量監測示範站，位置如圖 1-1，監測示範站設備於 3-1 節中詳細介紹，今年度至目前監測示範站持續運作進行資料收集。

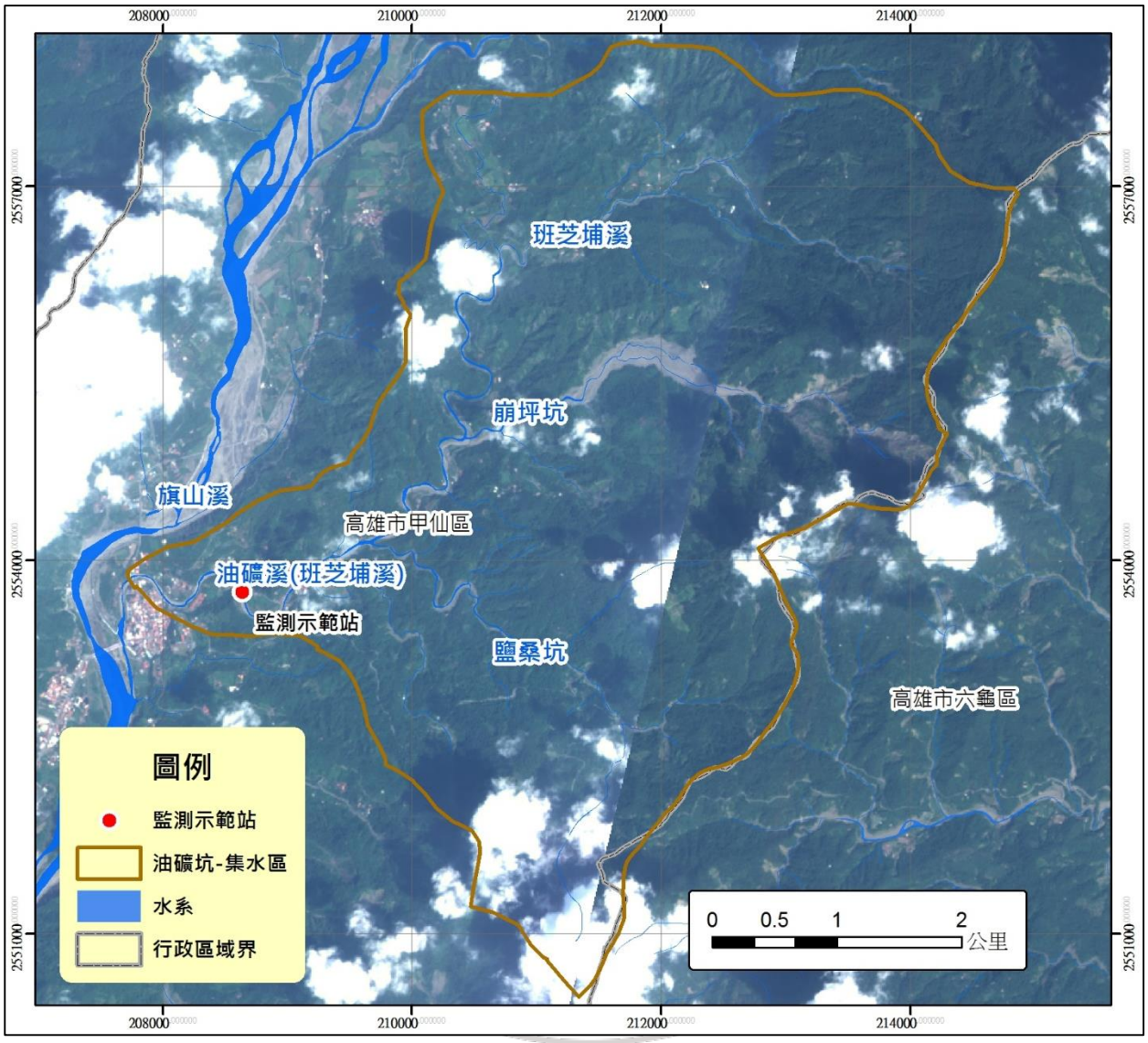


圖1-1 土砂流出量監測示範站設置點位

## 第三節　計畫工作項目

下列工作項目及內容依據採購契約詳列：

一、 現地監測儀器之維護與保養

(一) 定期維護與檢修周期

1. 每月至少進行 1 次現地定期維護與檢修。
2. 同一颱風或豪雨事件後(水土保持局台南分局開設土石流災害應變小組開設結束後)，10 個工作天內增加 1 次現地設備維護與檢修。
3. 契約執行期間(自簽約日迄期末簡報當日)，每日(工作日)遠端檢查監測系統至少 1 次。

(二) 定期維護與檢修工作內容

1. 針對監測示範站之儀器設備，管式水聲計(包含收音麥克風、音響轉換器及金屬管)、壓力式水位計、光學式濁度計、電磁式流速計、資料記錄器、太陽能電力系統(包含太陽能充電模組、充電控制器、電池)及儀器小屋進行現地保養、檢查測試和清潔工作，並將現場系統功能檢測結果紀錄彙整，請應當日拍照存檔，並填寫現地維護檢測表。
2. 監測系統遠端檢查，確認各項數據回傳正常。

(三) 儀器設備檢測校正

觀測期間儀器設備及線路之損壞修復，更換後需進行檢測調校工作並作成紀錄。

(四) 維運異常處理

本計畫執行期間，監測系統發生問題、無法正常運作或設備損壞需進行汰換或更新耗材，應於當日前傳真監測系統維運異常處理告知單通知水土保持局，並提出處理建議。

二、 河道底床載監測示範站之補強與改善

依據 106 年現地監測執行經驗，針對現地各式監測設備於颱洪期間

遭遇土砂淤埋、撞擊、沖刷造成儀器損壞之問題，研提補強與改善對策，包括：

(一) 水聲計強化

金屬管之管壁加厚或採平板式水聲計等改善對策，以增加承受撞擊能力，安裝後須進行設備檢修調校。

(二) 濁度計及水位計改善

採管徑加大或位置調整等改善對策，避免土砂淤埋或水草阻塞等情形，以達最佳量測效率。

(三) 電力及傳輸線材之保護與強化。

三、 設置河道底床載直接式量測裝置

(一) 擇定適用的底床載直接式量測裝置（如囚砂箱或其他等）並於現地設置，以搜集現地直接式量測資料配合水聲計資料相互驗證。

(二) 颱洪事件後應以人工配合機具等方式進行檢修及土砂清理，維持量測功能，以利後續量測作業之進行。

四、 河道底床載量測現地試驗

(一) 現地河床土砂材料採樣及特性分析。

(二) 現地以人工方式調整流量與供砂量，進行不同流量及供砂條件之現地試驗，配合下游端之囚砂設備，獲取完整的現地觀測與驗證數據，持續驗證量測成果之合理性。

五、 水聲計室內水槽試驗

(一) 利用實驗水槽針對水聲計強化方案進行測試，以人工方式進行不同供砂率、土砂材料、流量及配比等條件的試驗。

(二) 利用實驗水槽，針對水聲計量測方法之限制範圍、適用條件及誤差精度等持續進行測試，以掌握量測方法之合理性。

(三) 室內試驗資料收集與成果分析。

六、 現地監測成果綜合分析

(一) 現地監測資料分析（含雨量、水位、濁度等）。

(二) 針對室內試驗、現地試驗及現地監測成果校正撞擊次數與底床載輸砂量之關係式。

(三) 針對水聲計量測結果、底床載直接式量測結果與現行常用底床載輸砂量公式進行分析，探討觀測設備之合理性及應用性，以提供未來設站地點進行評估。

(四) 土砂監測檢討及後續建議

總和前期成果及本年度監測成果，針對監測方法之適用性與合理性持續進行檢討，並針對河道土砂流出量觀測系統未來之研究發展方向與設置規劃提出後續建議。

## 第四節　工作架構

依據計畫工作項目，本計劃設定工作架構圖如圖 1-2 所示。由計畫執行開始，持續進行**現地監測系統維護與保養**（第三章）包括儀器保養、異常處理、資料品管；並進行**河道底床載監測示範站儀器補強改善**（第四章）；於現地加設**直接式底床載量測設備**（第五章）；另外進行室、內外試驗，首先完成試驗設計規劃，並據此執行**河道底床載量測現地試驗**（第六章），以及**水聲計室內水槽試驗**（第七章），綜合現地監測成果、室內外試驗結果完成**現地監測成果綜合分析**（第八章），據此提出**土砂監測檢討及後續建議**（第九章），各項工作之執行構想與說明及成果列於各章中。

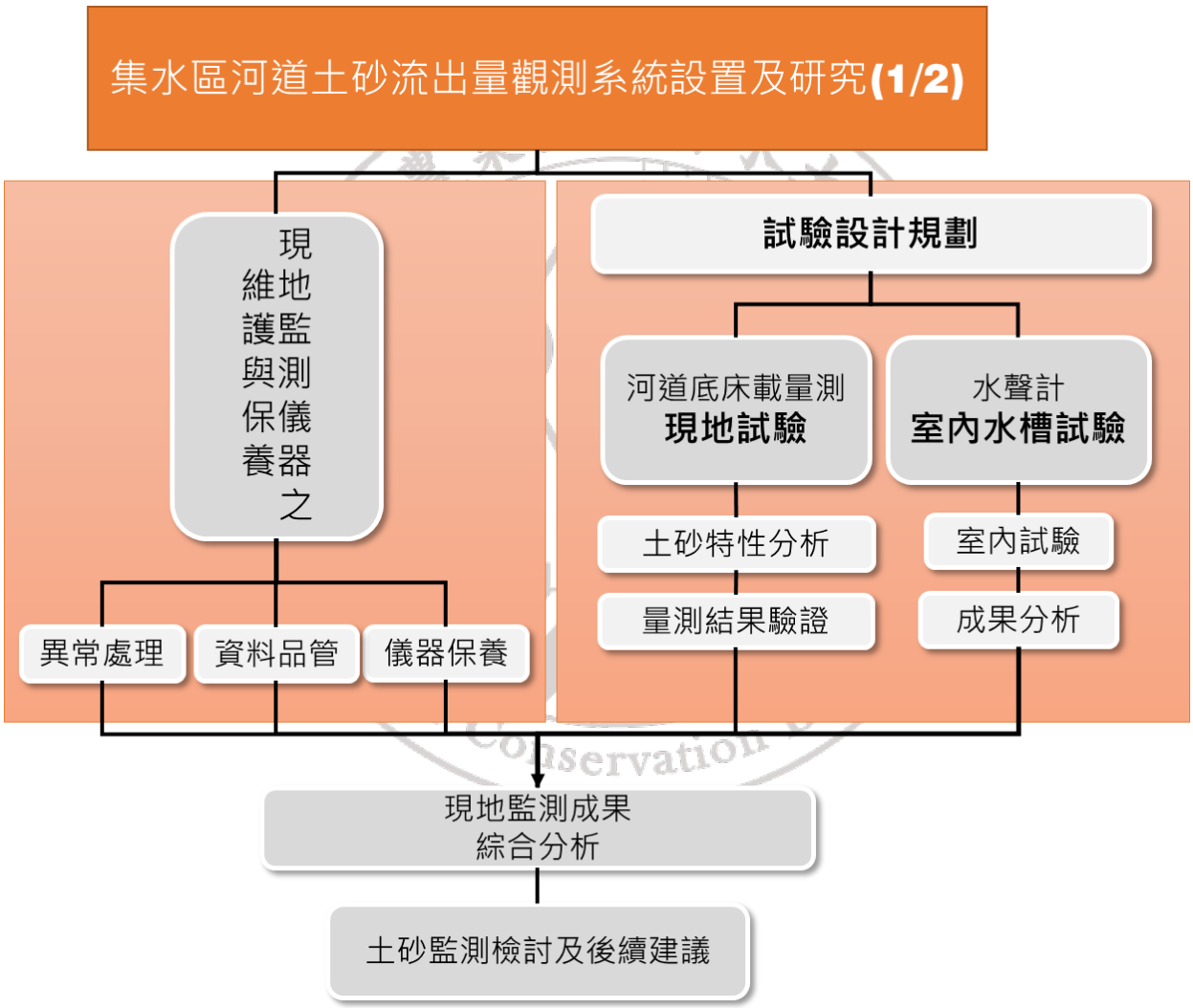


圖1-2 工作執行架構圖

## 第五節　工作時程

本計畫之工作內容包括現地監測儀器之維護與保養、河道底床載量測現地試驗、水聲計室內水槽試驗、現地監測成果綜合分析與土砂監測檢討及後續建議等，配合各工作之關聯性及執行限制等條件，依委託單位訂定之查核點規劃進度，擬定本計畫各期報告之執行進度及繳交時間。本計畫於議價契約成立完成後，於 107 年 3 月 19 日前提交期初工作執行報告書，說明各項工作執行之構想及作業流程、規劃現地試驗流程、材料、粒徑等試驗設計、規劃室內水槽試驗流程、材料、粒徑、流速、流量等試驗設計等；於 107 年 7 月 16 日前提交期中報告書，於 107 年 11 月 6 日前提出期末報告書。

本計畫於期末審查通過後，依審查委員所提意見進行修訂，並依會議裁決之期限內提送成果報告書，所有工作項目於 107 年 12 月 15 日時完成並結案。詳細工作進度安排如圖 1-3 所示，進度檢核表見表 1-1。

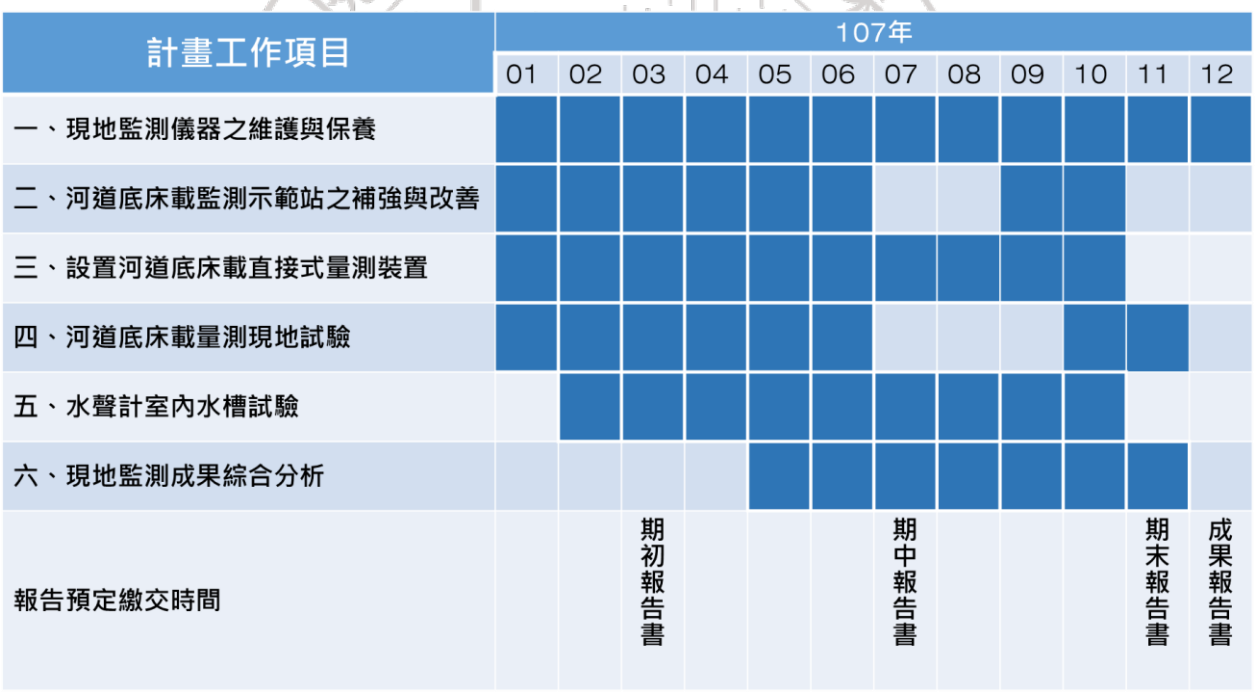


圖1-3 計畫執行進度甘梯圖

表1-1　進度檢核表

| 項次 | 工作項目 | 工作內容 | 需求數量 | 目前成果 | 需求進度 | 完成進度 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 現地監測儀器之維護與保養 | 定期維護與檢修(1~12月) | 1次/月 | 已完成1~12月例行維護及0613豪雨、0619豪雨、0702豪雨、0823熱帶低壓與山竹颱風事件後維護 | 100% | 100% |
| | | 儀器設備檢測校正 | | 目前底床流速計損壞，建議改為非接觸式流速計進行觀測 | 100% | 100% |
| | | 維運異常處理 | | 目前已通報底床流速計毀損並告請報廢 | 100% | 100% |
| 2 | 河道底床載檢測示範站之補強與改善 | 水聲計強化 | | 完成水聲計金屬管管材厚度強化 | 100% | 100% |
| | | 濁度計及水位計改善 | | 於左岸新增水位計減少資料缺少<br>濁度計因流心變動暫無淤積情形 | 100% | 100% |
| | | 電力及傳輸線材之保護與強化 | | 更換保護管材為不銹鋼減少鏽蝕影響 | 100% | 100% |
| 3 | 設置河道底床載直接式量測裝置 | 擇定底床載直接式量測裝置並設置 | | 完成設置囚砂箱體，並收集0619豪雨、0702豪雨後事件土砂 | 100% | 100% |
| | | 底床載直接式量測裝置檢修及清理 | | 完成0619豪雨、0702豪雨後箱內土砂清理並進行篩分析 | 100% | 100% |
| 4 | 河道底床載量測現地試驗 | 現地河床土砂材料採樣及特性分析 | | 完成2處現地河床質採樣分析 | 100% | 100% |
| | | 河道底床載量測現地試驗及改善規劃 | | 進行USFS現地試驗<br>利用現地囚砂箱進行高流量測試 | 100% | 100% |
| 5 | 水聲計室內水槽試驗 | 水聲計室內試驗 | | 進行偵測率及放大倍率差異試驗 | 100% | 100% |
| | | 室內試驗資料收集與成果分析 | | 嘗試以放大倍率差異進行土砂量推估，並推估修正係數 | 100% | 100% |
| 6 | 現地監測成果綜合分析 | 現地監測資料分析 | | 已分析0613豪、0619豪雨、0702豪雨、0823熱帶低壓與山竹颱風事件 | 100% | 100% |
| | | 針對試驗成果與監測成果建立土砂輸送推估式 | | 透過現地試驗與囚砂坑及水聲計監測成果，持續改善關係式，已推估事件土砂輸送量進行比較分析 | 100% | 100% |
| | | 探討觀測設備合理性及應用性 | | 已探討日本現有60處水聲計設置地點其相關地形與集水區大小，並評估水保局現有土砂測站 | 100% | 100% |
| | | 土砂監測檢討及後續建議 | | 提出相關監測檢討與改善建議 | 100% | 100% |

# 第二章　前期計畫成果

本章主要針對前期計畫成果進行彙整說明前期計畫監測系統設置緣由及監測系統概要簡介，並針對本計畫所使用之日本管式水聲計（以下簡稱水聲計）介紹其運作原理，最後針對日本水聲計監測沿革及現況，借鑒日本方面已多年應用水聲計於土砂監測之經驗，分別說明如下各節。

## 第一節　105 年計畫成果

於 105 年度計畫「集水區河道土砂流出量觀測系統設置之先期研究」中，已彙整台灣監測成果，懸浮載監測資訊由水利部門執行，且已累積相當長期之資料，而底床載觀測資料相較於懸浮載觀測資料來說，資料量相當稀少，主要因為底床載直接量測，於高流量條件下，將測量儀器置入湍急水流中儀器容易損壞，人員亦有相當之危險性，而於低流量條件下則較難以取得明顯底床載資料，故為深入了解土砂運移現象，新式底床載監測技術引入及開發，以蒐集、累積底床載監測資訊，為一基礎且重要之課題。

105 年度計畫中參考國內外相似水文、地形環境之國家底床載監測文獻，現行底床載監測發展現況，主要以間接式[1]底床載之觀測設備為主，故由圖 2-1 可知，圖中分別以聲波觀測、變形量（應力與應變）觀測與震動觀測，以及監測底床載之輸砂運動型態範圍，對應到水聲計（Hydrophone）、荷重計（Load cell）、與地聲計（Geophone）三種不同的底床載感測器，於 105 年度首先引入**日本管式水聲計**監測設備，在高雄市甲仙區油礦溪設置示範站，將於 3-1 節中進行詳細說明，以下進行管式水聲計介紹以及量測原理說明。

1.間接式底床載監測非直接採取底床載

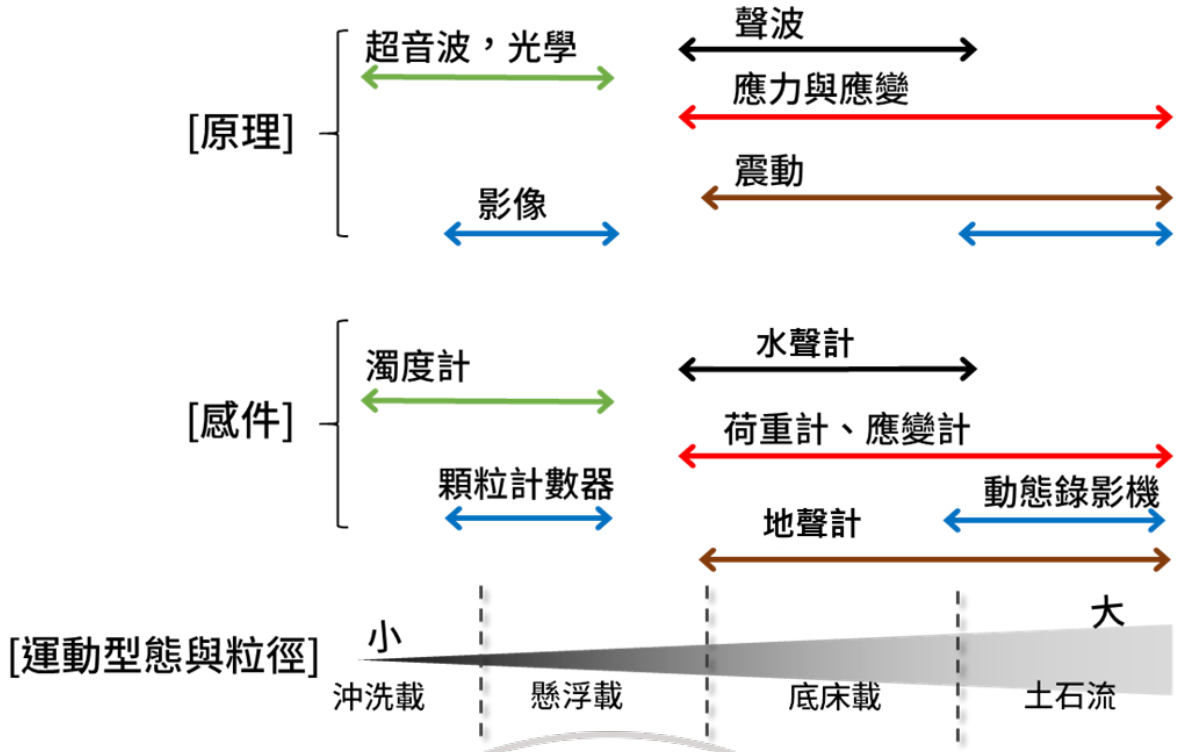


圖2-1 河道輸砂監測原理、感測器與適用範圍

一、管式水聲計架構：

管式水聲計主要由承受土砂顆粒撞擊的鋼管與收集撞擊聲音訊號的麥克風所組成，詳見圖 2-2，其後端有音訊放大器及音訊轉換器進行音訊處理，轉換處理後之資料儲存至資料紀錄器中，如圖 2-3。




圖2-2 管式水聲計組成示意圖

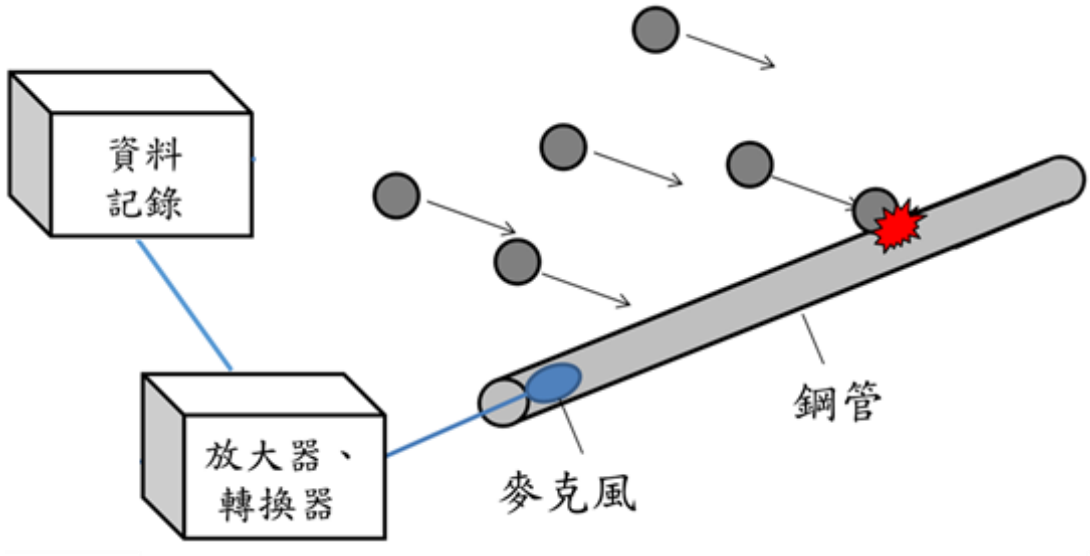


圖2-3 管式水聲計設置架構

二、管式水聲計量測原理：

監測示範站所使用之管式水聲計其感件所擷取之訊號，透過放大，透過濾波及門檻值設定，擷取固定時間間隔之訊號，可分析其顆粒撞擊次數，進而利用其紀錄音壓值與動量關係進行土砂量推算，針對水聲計運作原理說明如下：

利用管內麥克風紀錄上游來砂顆粒撞擊金屬管所產生之聲音訊號，如圖2-4，而產生之聲音訊號可分為軸向、徑向以及圓周向，如圖 2-5 所示，其中與顆粒撞擊相關性最高為圓周向之聲音訊號，訊號於麥克風進行初步放大，進入變換器濾除其他向波形，留下圓周向音頻訊號，如圖 2-6 a，在經過變換器不同倍率放大，經轉換後得到音壓之波形紀錄，如圖 2-6 b，再經過方波轉換（Square transform）成為方波，如圖 2-6 c，方波利用門檻值進行判斷，通過門檻值即視為一次顆粒撞擊，較大之放大倍率能量測到粒徑較小之顆粒的撞擊，較小之放大倍率所能量測到之撞擊顆粒其粒徑較大，故需依照不同土砂環境選擇適合之放大倍率進行分析，水聲計最後可得兩項觀測資料為**不同倍率之顆粒撞擊次數**（如圖 2-6 d）以及**音壓波形紀錄**。

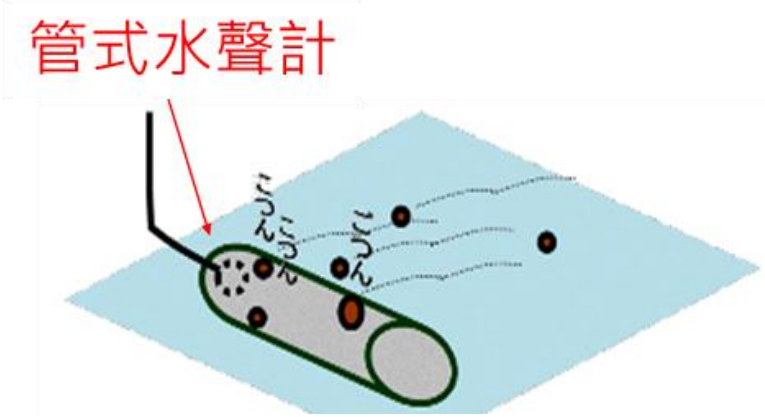


圖2-4 土砂顆粒撞擊管式水聲計示意圖

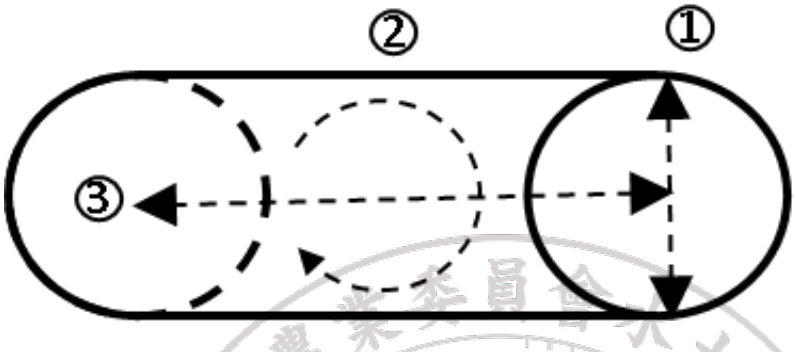


圖2-5 水聲計三種不同方向聲波示意圖

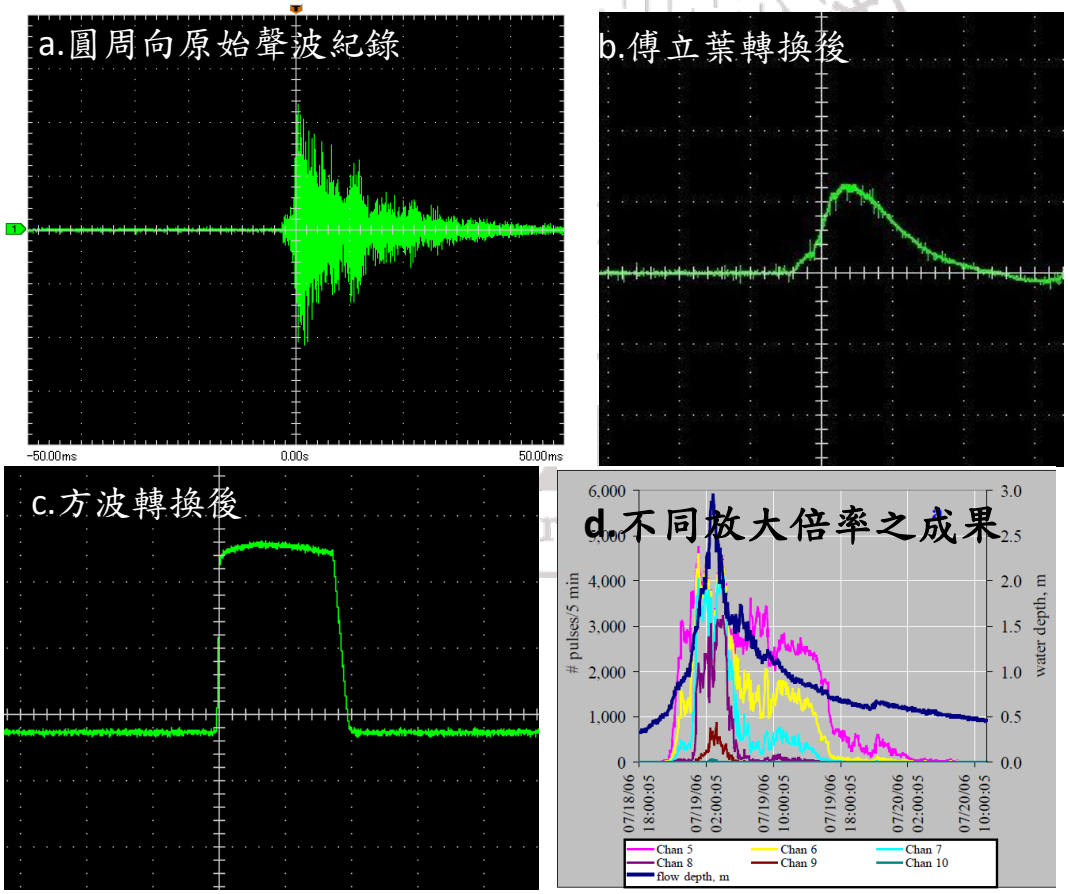


圖2-6 聲波轉換示意圖

105 年度計畫之主要成果為河道底床載土砂流出量監測示範站之建置，該示範站建於高雄市甲仙區油礦溪的慈恩橋之上游河段，詳見圖 2-7，而監測示範站設置點位挑選，係由水保局會同國內外專家學者共同進行現地會勘後訂定，監測示範站建置的遴選點位皆分佈於高雄市行政區內，位於下列三個區域：美濃區、六龜區、甲仙區，每區各有兩個點位備選，共六個點位，之後針對 3 處示範站點位之土砂運移量、通水斷面變動可能性、儀器毀損風險與維護便利性、資料傳輸之需求（通訊信號強度）、電源供給之需求以及紀錄資料代表性、完整性進行討論，綜合各專家及水土保持局相關人員意見及討論成果，最後選定於高雄市甲仙區油礦溪慈恩橋段設置監測示範站。




圖2-7 河道底床載土砂流出量監測示範站設置行政位置圖

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

監測儀器安裝於河道中的固床工上，該河段因攔砂壩有一缺口存在，故流心穩定變動幅度小，對於水聲計資料收集的完整度較佳，另外兩側河岸皆有人工護岸，河道橫斷面變動小，於分析計算上可減少不必要的變數，周圍環境與相關儀器配置詳見圖 2-8，裝設儀器一覽表參照表 2-1。




圖2-8 105 年度觀測系統儀器配置示意圖

Soil & Water Conservation Bureau, COA

現地裝設之感測儀器為水聲計、濁度計、水位計與底床流速計，另包括紀錄資料器、電力設備以及傳輸設備，詳細配置詳見圖 2-9、圖 2-10。

表2-1　河道底床載土砂流出量監測示範站設備一覽表

| 種類 | No. | 項目 | 型號 |
|---|---|---|---|
| 感測設備(Sensors) | 1 | 管式水聲計 | |
| | 2 | 壓力式水位計 | 盛邦 Pm-420w |
| | 3 | 光學式濁度計 | Observator Nep5000tps |
| | 4 | 電磁式底床流速計 | Aichitokei RF |
| 紀錄裝置(Loggers) | 5 | 資料紀錄器 | Campbell CR-1000 |
| | 6 | 訊號轉換器 | Hydrotech HT-HP5 |
| 電力供應設備 | 7 | 太陽能充電模組及蓄電池 | |
| 通訊設備 | 8 | 3G 通訊模組 | |
| 儀器小屋 | 9 | 儀器小屋 | |

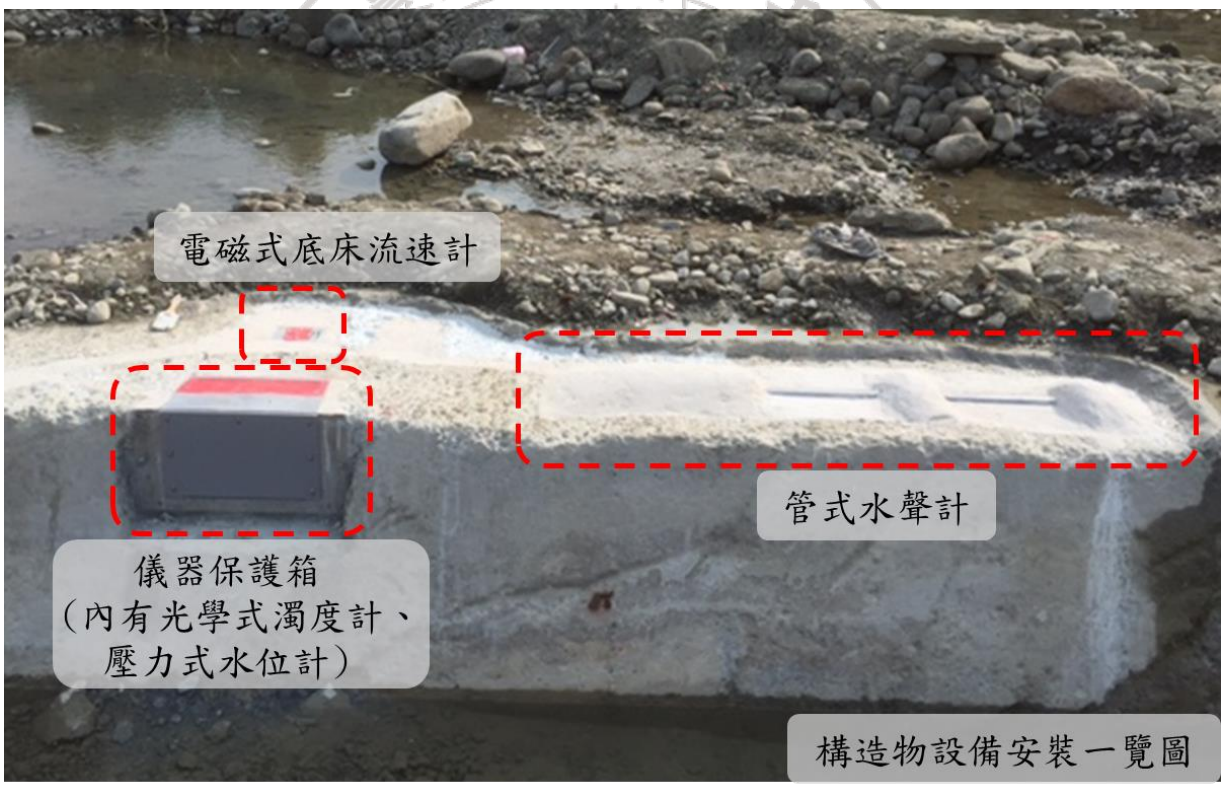


圖2-9 構造物設備安裝一覽圖

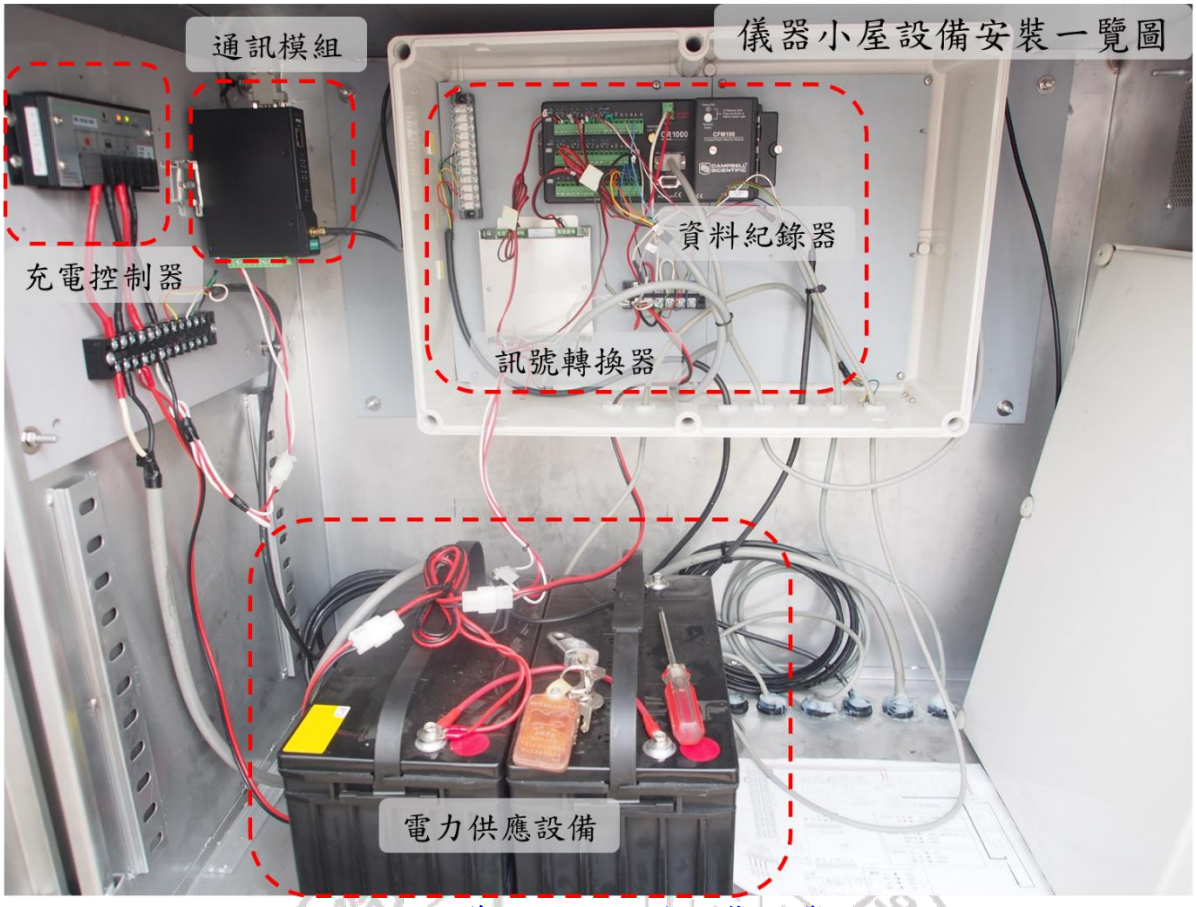


圖2-10 儀器小屋設備安裝一覽圖

## 第二節　106 年計畫成果

106 年度計畫中因所利用之相關設備皆有其量測極限，3 mm 管厚之管式水聲計量測粒徑適合為 4 mm 至 300 mm 間，量測目標為河道底床所運移之土砂，且量測次數每 5 分鐘低於 3000 次其資料較具可信性，日本裝設位置多位於攔砂壩或固床工上，坡度為 0.17 度至 10 度，集水區面積為 10 至 900 平方公里，底床流速計精確量測範圍為 0.5～5 公尺每秒，水位計精確量測範圍為 0～5 公尺，濁度計精確量測範圍為 0～5000 NTU，並於 106 年度監測過程中提出改善建議進行濁度計與水位計遷移作業，遷移後儀器配置位置圖如下圖 2-11 所示。




圖2-11 106 年度觀測系統儀器配置示意圖

利用 105 年度所建置之間接式監測設備收集現地底床載資料，106 年度除尼莎颱風、海棠颱風因水聲計因受塊石使水聲計金屬管表面凹陷，如圖 2-12，

為維持收集資料代表性、可靠度而更換管材外，全年度共收集 3 場事件中底床載連續資料，分別為 0601 豪雨、0613 豪雨、尼莎颱風與海棠颱風，最大流量事件為尼莎颱風與海棠颱風，最大水深達 180 公分，最大平均流速為 7.8 公尺每秒，由現場監測資料進行計算可啟動最大粒徑達 100 公分，故超出水聲計金屬管耐受強度而導致凹陷。



圖2-12 106 年度尼莎颱風與海棠颱風後水聲計金屬管凹陷

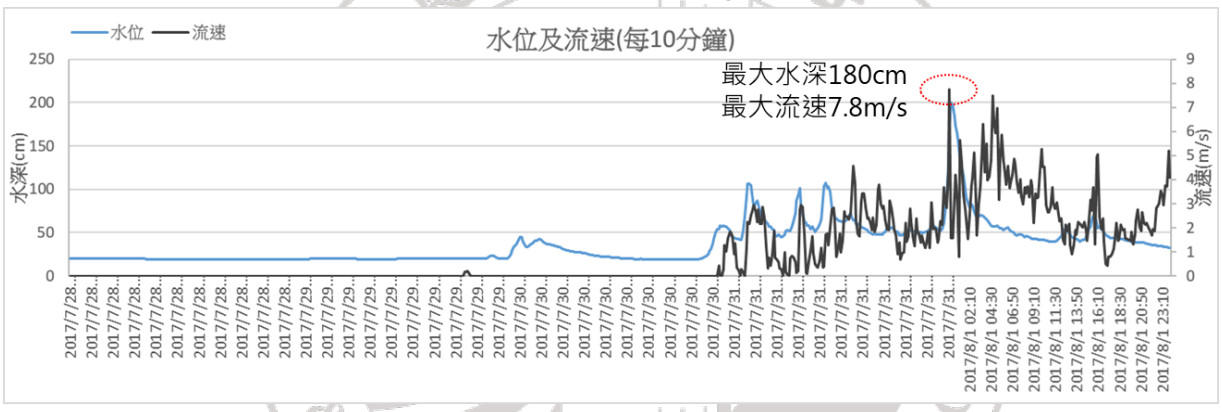


圖2-13 106 年度尼莎颱風與海棠颱風水位及流速監測成果

於 106 年度計畫中利用人工供砂撞擊水聲計之現地試驗，建立水聲計撞擊次數與輸砂量關係曲線（如圖 2-14 所示），目前已完成初步之關係曲線，可作為底床載輸砂量推估之用，但該曲線因現地試驗條件限制較適合於中低流量推估用，如欲用於高流量推估則還需校正。

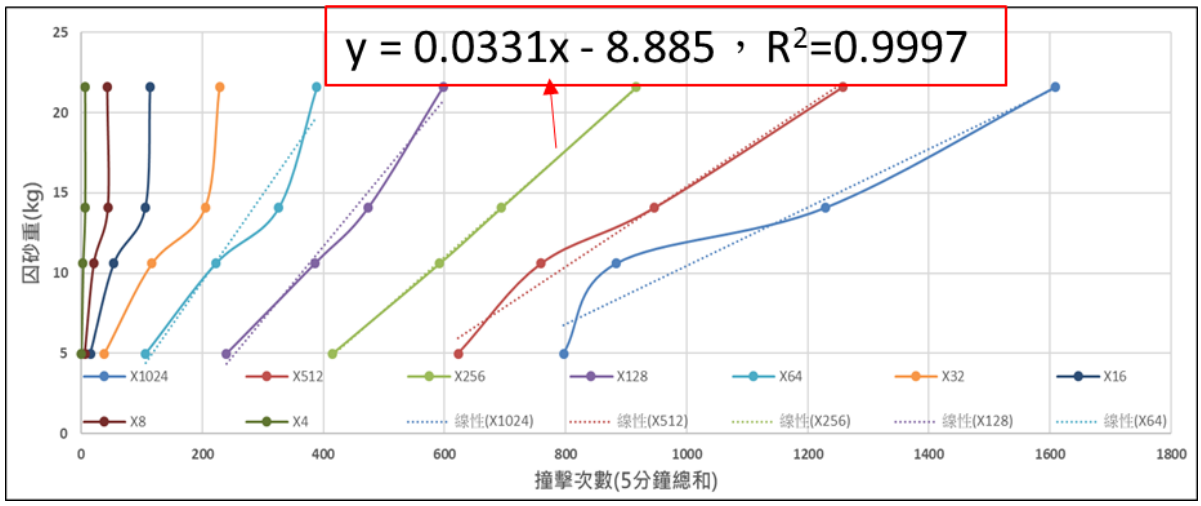


圖2-14 106 年度現地試驗完成之水聲計撞擊次數與輸砂量關係曲線

利用常見底床載推估公式(1)Meyer-Peter Müller 式、(2)何智武式、(3)吳益裕式，所推估之底床載輸砂量，使用參數如表 2-2～表 2-4 所示，與水聲計推估土砂量進行比較，如表 2-5 所示，顯示略低於 Meyer-Peter Müller 式，其餘兩式則較高於水聲計推估，故過去可能有高估底床載運移量。

表2-2 Meyer-Peter Müller 式計算參數

| n | Q (cms) | S | 水位$H_0$ (m) | A ($m^2$) | R | $D_{50}$ (cm) | 平均流速 v(m/s) | 底床摩擦速度$u_*$ (cm/s) | $\tau_*$ | $\tau_{*C}$ | $q_b$ (cms/m) | $Q_b$ ($m^3$/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0886 | 14.450 | 0.024 | 0.48 | 13.67 | 0.47 | 1.7 | 1.057 | 33.3 | 0.425 | 0.052 | 0.0002 | 36 |

表2-3 何智武式計算參數

| Q (cms) | 水位$H_0$ (m) | S | A ($m^2$) | R | $D_{50}$ (cm) | 平均流速 v(m/s) | $\tau_*$ | $q_C$ | $q_s$ (cms/m) | $Q_s$ ($m^3$/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14.450 | 0.48 | 0.024 | 13.67 | 0.47 | 1.7 | 1.057 | 0.425 | 0.048 | 0.0008 | 76.389 |

表2-4 吳益裕式計算參數

| Q (cms) | 水位$H_0$ (m) | S | A ($m^2$) | $\sigma$ | R | $D_{50}$ (cm) | 平均流速 v(m/s) | $\tau_*$ | $q_C$ | $q_s$ (cms/m) | $Q_s$ ($m^3$/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14.450 | 0.48 | 0.024 | 13.67 | 2.85 | 0.47 | 1.7 | 1.057 | 0.425 | 0.08 | 0.0039 | 391.222 |

表2-5　106 年度現地監測成果推算土砂運輸量

| 估算式 | 底床載輸砂量($m^3$/hr) |
|---|---|
| Meyer-Peter Müller式 | 36 |
| 何智武式 | 76 |
| 吳益裕式 | 391 |
| 水聲計估算 | 31 |

另於室內進行水聲計特性釐清試驗，針對土砂顆粒粒徑大小對水聲計之反應差異、不同土砂材質對水聲計之反應差異以及不同土砂供給量對水聲計之反應差異，並在推估計算上除推估土砂運移量外，於室內試驗中利用音壓動量關係（如圖 2-15），藉由不同土砂顆粒傳及水聲計金屬管所產生之音壓，與撞擊瞬間之土砂顆粒速度，進行土砂粒徑推估計算，但此推算方式尚存許多變因，後續需減少變因以確保推估準確率。

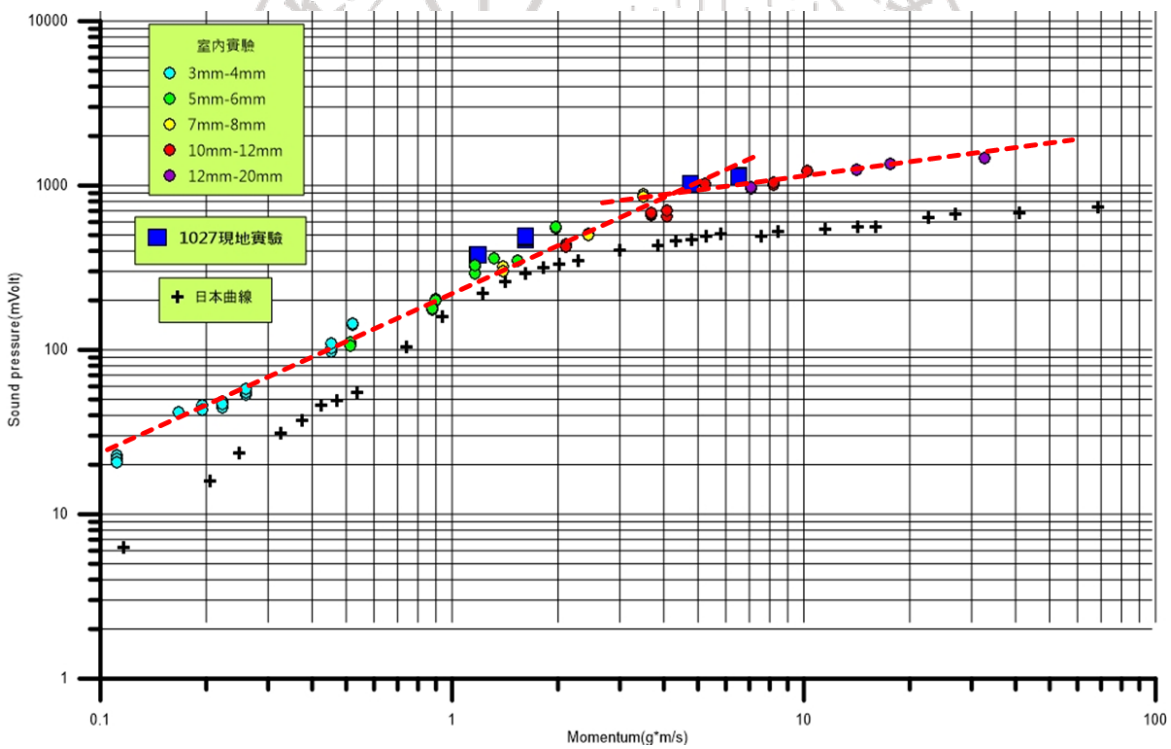


圖2-15 土砂顆粒撞擊水聲計之音壓與動量關係

示範站設置期間於事件期間已可取得連續之監測資料，如圖 2-16，雖受到部份受到土砂堆積影響，濾除受影響資料後，所收集底床載輸砂量將具代表

性，配合水位及底床流速等監測數據，可作為上下游治理之參考，並可作為模擬之驗證資料。

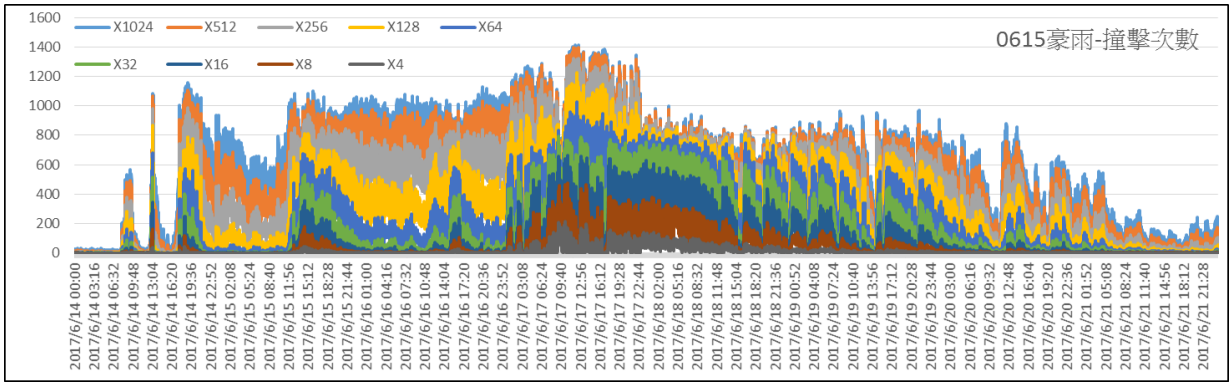


圖2-16 106 年 0613 豪雨-水聲計撞擊次數（每分鐘）

間接式觀測設備因非直接量測底床載，其率定及驗證工作相對重要，藉由足夠且正確之率定驗證工作，方可有效反應實際底床載，106 年度計畫已完成 106 年期間持續監測，並取得降雨事件期間連續監測資料，今年度計畫延續前期計畫，並提出補強改善，期能由**現地監測資料**、**室內試驗**、**室外試驗**，獲得更充足實測及驗證資料，了解水聲計之使用限制與應用於臺灣之適用性，最後透過觀測成果與實際結果之差異進行評估與探討，以及與既有推估方式進行比較，作為後續土砂運移評估之參考。


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 第三章　現地監測儀器之維護與保養

現地監測系統建置完成後，為確保監測系統持續正常運作，定期維護與檢修為主要工作，除此之外遭遇天然事件造成儀器損壞或異常，令其無法正常運作等情況，期能於最短時間內完成修復，使監測系統之資料收集較為完整，對後續評估分析較無疑慮。

## 第一節　現地監測儀器之配置

河道土砂流出量監測示範站於 105 年度建置於高雄市甲仙區油礦溪的慈恩橋之上游河段，詳見圖 3-1，現地裝設之感測儀器為管式水聲計、光學濁度計、壓力式水位計與電磁式底床流速計，另包括紀錄資料器、電力設備以及傳輸設備；今年度為提升監測資料品質及後續相關應用，於河道左岸新增一壓力式水位計，避免原設置水位計未接觸水面以及受土砂淤積影響，並於水聲計下游加設一囚砂箱，配合水聲計資料進行後續分析應用，現場儀器配置詳見圖 3-2，儀器詳細規格詳見附錄一。




圖3-1 河道底床載土砂流出量監測示範站設置行政位置圖

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)




| 種類 | No. | 項目 |
|---|---|---|
| 感測設備 (Sensors) | 1 | 管式水聲計 |
| | 2 | 壓力式水位計 |
| | 3 | 光學式濁度計 |
| | 4 | 電磁式底床流速計 |
| 紀錄裝置 (Loggers) | 5 | 資料紀錄器 |
| | 6 | 訊號轉換器 |
| 電力供應裝置 | 7 | 太陽能充電模組及蓄電池 |
| 通訊設備 | 8 | 3G通訊模組 |
| 儀器小屋 | 9 | 儀器小屋 |
| 囚砂箱 | 10 | 囚砂箱 |

圖3-2 河道土砂流出監測示範站儀器配置圖

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

## 第二節　儀器之維護與保養方法

定期維護與檢修之周期，根據工作項目所訂定，(1) 每月至少進行一次現地定期維護與檢修，(2) 同一颱風或豪雨事件後（水土保持局台南分局開設土石流災害應變小組開設結束後），10 個工作天內增加 1 次現地設備維護與檢修，(3) 契約執行期間（自簽約日迄期末簡報當日），每日（工作日）遠端檢查監測系統至少 1 次，維護流程詳見圖 3-4。

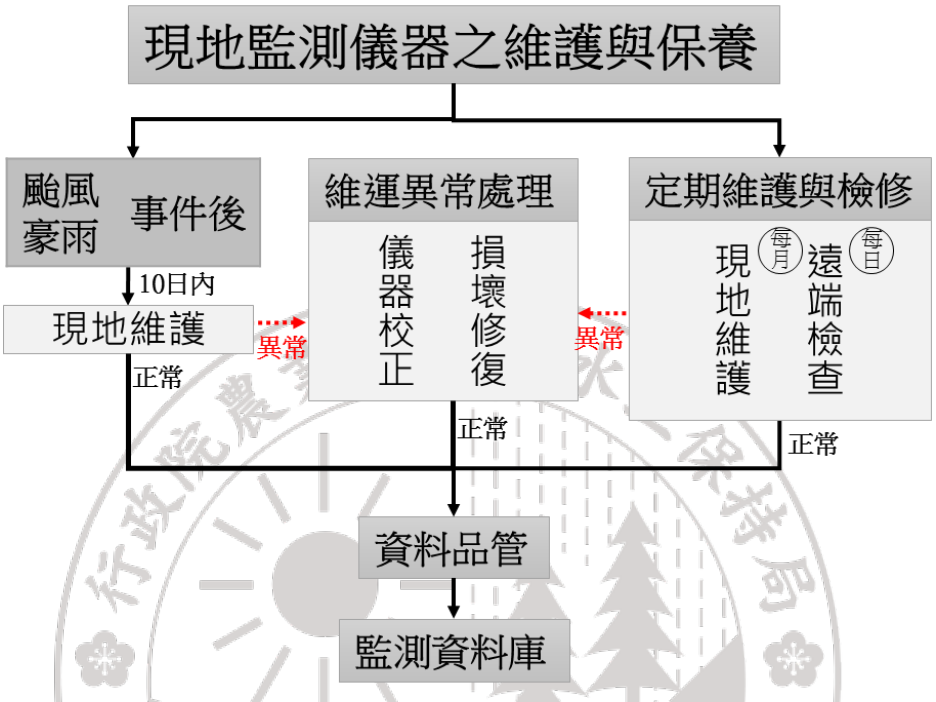


圖3-3 現地監測儀器維護流程圖

### 一、 定期維護與檢修工作內容

定期維護與檢修的相關工作內容，主要針對監測示範站之儀器設備，管式水聲計（包含收音麥克風、音響轉換器及金屬管）、壓力式水位計、光學式濁度計、電磁式流速計、資料記錄器、太陽能電力系統（包含太陽能充電模組、充電控制器、電池）及儀器小屋與囚砂箱進行現地保養、檢查測試和清潔工作，如表 3-1，並將現場系統功能檢測結果紀錄彙整，以及附上當日維護檢修之前後影像照片，並填寫現地維護檢測表（詳見表 3-2），今年度執行成果詳見附錄二。

(一) 管式水聲計：

1. 維護要點：確認水聲計外觀是否有受損或水垢增生之情形，如有受損則確認對儀器保全之影響以及資料監測收集之影響，並提出後續處理方法，如有水垢覆蓋於水聲計鋼管表面則進行清理，降低水垢對檢測之影響，見圖 3-4。

2. 檢測要點：於河道中以較簡易方式擋水後，於無水流影響條件下，利用固定高度下之自由落下的鋼球於 1 分鐘內撞擊水聲計 10 下，現場確認紀錄資料是否相同；若水流較強無法擋水，則採以固定力道敲擊水聲計 10 下進行檢測；於洪水期間，人員難以進入河道中，則僅檢測訊號，不進行水聲計敲擊量測比對。

(二) 壓力式水位計：

1. 維護要點：確認水位計外觀是否有受損或土砂淤塞之情形，如有受損則確認對儀器保全之影響以及資料監測收集之影響，如有土砂淤塞於水位計感測端則進行清理，避免對量測造成干擾，見圖 3-5。

2. 檢測要點：於現場利用已知水深之水瓶，將水位計置入瓶中，量測 3 至 5 分鐘，現場比對紀錄資料與量測數據，見圖 3-6；於汛期期間，如人員仍能安全進入河道則利用水尺比對現場水位與回傳水位是否相符；若人員難以進入河道中，則僅檢測訊號，不進行水位比對。

(三) 光學式濁度計：

1. 維護要點：確認濁度計外觀是否有受損或土砂淤塞之情形，如有受損則確認對儀器保全之影響以及資料監測收集之影響，如有土砂淤塞於濁度計感測端則進行清理，避免對量測造成干擾，見圖 3-7。

2. 檢測要點：於現場利用已知濁度之水樣與清水交叉比對濁度計量測記錄數據，於洪水期間，人員難以進入河道中，則採取水樣進行量測比對，見圖 3-8。

(四) 電磁式底床流速計：

1. 維護要點：確認流速計外觀是否有受損或水垢增生之情形，如有受損則確認對儀器保全之影響以及資料監測收集之影響，並提出後續處理方法，如有水垢覆蓋於流速計表面則進行清理，降低水垢對檢測之影響，見圖 3-9。

2. 檢測要點：於河道中利用旋槳式流速計（JDC-Flowatch）量測流速，再與現場紀錄資料比對，如圖 3-10，若水深過低難以量測，則於現場進行圍水，提升水深進行量測，於洪水期間，人員難以進入河道中，則僅檢測訊號，不進行流速量測比對。

表3-1 定期維護檢測項目表

| 種類 | No. | 項目 | 遠端監測 | 現地檢測 |
|---|---|---|---|---|
| 感測設備 (Sensors) | 1 | 管式水聲計 | 是否回傳資料、資料是否異常 | 鋼球或人工敲擊檢測回傳聲音訊號 |
| | 2 | 壓力式水位計 | | 利用已知水深之水瓶量測比對 |
| | 3 | 光學式濁度計 | | 利用已知濁度之水樣量測比對 |
| | 4 | 電磁式底床流速計 | | 量取流速比對紀錄資料 |
| 紀錄裝置 (Loggers) | 5 | 資料紀錄器 | | 比對原始訊號與紀錄資料 |
| | 6 | 訊號轉換器 | | |
| 電力供應裝置 | 7 | 太陽能充電模組及蓄電池 | 是否回傳資料、電壓是否過低或異常 | 檢測充放電曲線 |
| 通訊設備 | 8 | 3G通訊模組 | 資料是否正常回傳 | 資料是否正常回傳 |
| 儀器小屋 | 9 | 儀器小屋 | - | 外觀檢測 |
| 直接式監測設備 | 10 | 囚砂箱 | - | 外觀檢測、資料紀錄、設備清理 |

表3-2　監測系統現地維護檢測表

| 觀測站名稱 | | 河道底床載監測示範站 | |
|---|---|---|---|
| 維護人員： | | 維護日期：　　年　　月　　日 | |
| 設備名稱 | 檢查項目 | 測試結果 | 處理情形 |
| 管式水聲計 | 外觀 | □正常□異常 | |
| | 訊號 | □正常□異常 | |
| 壓力式水位計 | 外觀 | □正常□異常 | |
| | 訊號 | □正常□異常 | |
| 光學式濁度計 | 外觀 | □正常□異常 | |
| | 訊號 | □正常□異常 | |
| 電磁式流速計 | 外觀 | □正常□異常 | |
| | 訊號 | □正常□異常 | |
| 電力系統－太陽能板 | 電壓值 | □正常□異常 | |
| 電力系統－蓄電池 | 電壓值 | □正常□異常 | |
| 資料記錄器 | 訊號 | □正常□異常 | |
| 傳輸系統 | 連線情形 | □正常□異常 | |
| 儀器小屋 | 外觀 | □正常□異常 | |
| 囚砂箱 | 外觀 | □正常□異常 | |
| 其他說明 | | | |



圖3-4 管式水聲計鋼管水垢清理（107 年 4 月 24 日）



圖3-5 水位計感測端沾黏土砂之情況（106 年 5 月 24 日）



圖3-6 水位計置入已知水深之水瓶進行檢測（107 年 1 月 30 日）



圖3-7 水位計與濁度計感測端（107 年 7 月 23 日）

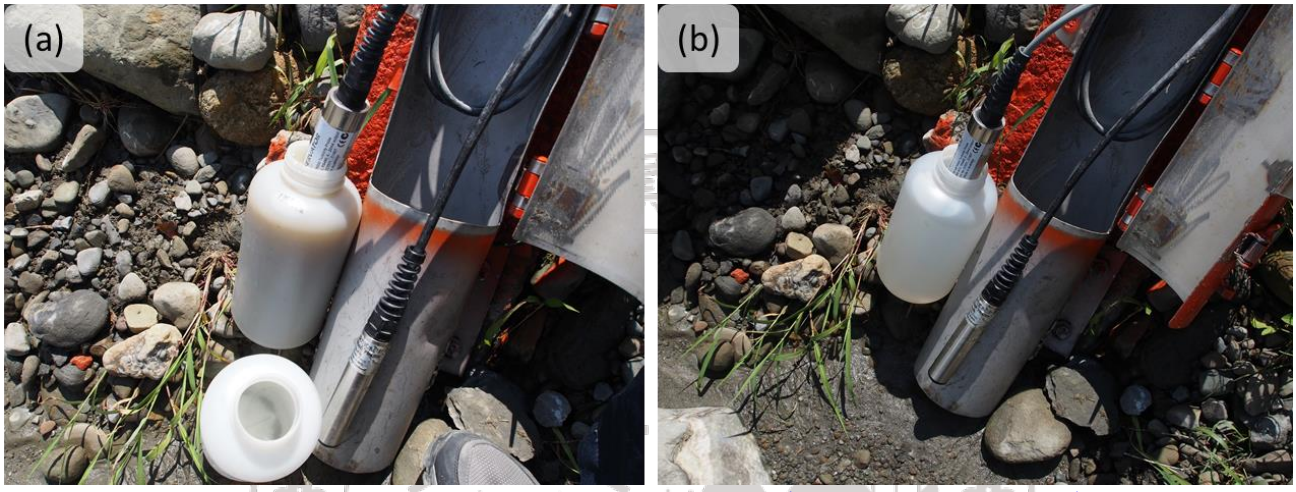


圖3-8 濁度計利用濁水與清水進行檢測（107 年 7 月 10 日）



圖3-9 流速計表層清理（107 年 4 月 24 日）




圖3-10 旋槳式流速計量測示意圖（107 年 3 月 23 日）

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

## 二、 每日遠端檢查工作內容

每日需進行至少一次監測系統遠端檢查，利用遠端連線確認水聲計、水位計、濁度計及流速計等各項數據回傳正常，當回傳數值超出正常範圍或是出現負值、異常值等情況，則視為異常，回傳數據表如下圖 3-11，並填寫遠端檢查表（詳見表 3-3），相關執行結果詳見附錄三。

| 紀錄時間 | 流水號 | 電壓 | 氣溫 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 撞擊次數 | 水位 | 濁度 | 流速 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TIMESTAMP | RECORD | (volt) | (°C) | X1024 | X512 | X256 | X128 | X64 | x32 | X16 | X8 | X4 | (cm) | (ntu) | (m/s) |
| 2017/3/1 00:01 | 9336 | 12.96 | 20.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.501 | 492.6 | 0 |
| 2017/3/1 00:02 | 9337 | 12.96 | 20.28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.493 | 495.4 | 0 |
| 2017/3/1 00:03 | 9338 | 12.96 | 20.26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.506 | 458.6 | 0 |
| 2017/3/1 00:04 | 9339 | 12.96 | 20.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.519 | 392.9 | 0 |
| 2017/3/1 00:05 | 9340 | 12.96 | 20.23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.537 | 400.1 | 0 |
| 2017/3/1 00:06 | 9341 | 12.96 | 20.21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.514 | 339.2 | 0 |
| 2017/3/1 00:07 | 9342 | 12.96 | 20.21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.527 | 283 | 0 |
| 2017/3/1 00:08 | 9343 | 12.96 | 20.18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.53 | 415.1 | 0 |
| 2017/3/1 00:09 | 9344 | 12.96 | 20.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.535 | 329.4 | 0 |
| 2017/3/1 00:10 | 9345 | 12.96 | 20.15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.522 | 337.4 | 0 |
| 2017/3/1 00:11 | 9346 | 12.96 | 20.13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.552 | 329.2 | 0 |
| 2017/3/1 00:12 | 9347 | 12.96 | 20.11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.546 | 402.4 | 0 |
| 2017/3/1 00:13 | 9348 | 12.96 | 20.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.534 | 350.4 | 0 |
| 2017/3/1 00:14 | 9349 | 12.96 | 20.09 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.568 | 302.8 | 0 |
| 2017/3/1 00:15 | 9350 | 12.96 | 20.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.594 | 322.6 | 0 |

圖3-11 監測系統記錄格式

Soil & Water Conservation Bureau, COA

表3-3　監測系統遠端檢查表

| 土砂流出量監測系統遠端定期檢查表 | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 日期 | 水聲計 | | 水位計 | | 濁度計 | | 流速計 | | 檢查人員 | |
| 年<br>月<br>日 | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | | |
| | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | | |
| 日期 | 水聲計 | | 水位計 | | 濁度計 | | 流速計 | | 檢查人員 | |
| 年<br>月<br>日 | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | | |
| | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | | |
| 日期 | 水聲計 | | 水位計 | | 濁度計 | | 流速計 | | 檢查人員 | |
| 年<br>月<br>日 | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | | |
| | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | | |
| 日期 | 水聲計 | | 水位計 | | 濁度計 | | 流速計 | | 檢查人員 | |
| 年<br>月<br>日 | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | OK□ | NG□ | | |
| | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | 狀況及處置： | | | |

三、 儀器設備檢測校正

觀測期間儀器設備及線路之損壞修復，**更換後**需進行檢測調校工作並作成紀錄。

(一) 管式水聲計：

設備更換後透過現地測試，於固定高度，分別以直徑 4mm 與 8mm 的固定質量之鋼球自由落下，撞擊水聲計，詳見圖 3-12(a)，如測得之數據符合室內測試之趨勢線，詳見圖 3-12(b)，則校正完成，如有所偏差，則調整固定套環之鬆緊程度，使其量測數據符合室內實驗之趨勢線。

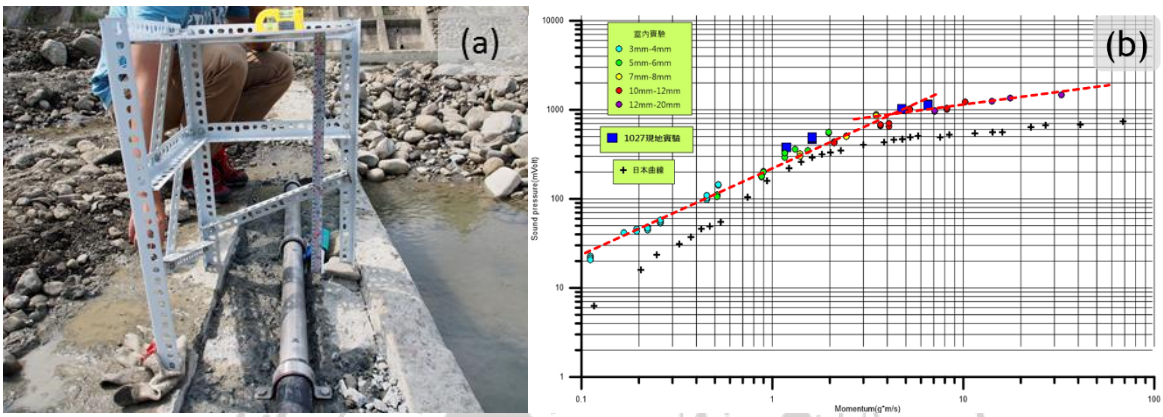


圖3-12 管式水聲計檢測校正：(a)現地測試示意圖 (b)室內測試趨勢線圖

(二) 水位計：

水位計於現地安裝前，透過水槽注水確認水位值與電流之關係性，如圖 3-13，現地安裝後，再利用容器裝水測試水位計讀值是否正常，如有偏差，則再進行調整確認，直至正常運作。

Piezoresistive Pressure Transmitter

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| TYPE | PM-420W | | SN: A16272 | |
| OUTPUT | 4 ~ 20 mA | | | |
| RANGE | 0 - 5mH$_2$O | | | |
| | | | mA | mH$_2$O |
| Accuracy | ±0.1%FS | | 4.000 | 0.000 |
| Max. Pressure | 7.5 mH2O | | 8.023 | 1.253 |
| Supply | 12-24 V$_{DC}$ | | 12.042 | 2.510 |
| Comp. Temp. Range | 0-60℃ | | 16.017 | 3.752 |
| Y=RX+C | R=0.3127 | C= -1.25384 | 20.008 | 5.006 |
| BK = +Vcc | RD = Iout | | | |
| | | | 2016/9/10 | |

圖3-13 水位計率定紀錄

(三) 濁度計：

濁度計於現地安裝前，透過利用標準液測試濁度計準確性率定，如圖3-14，現地安裝後，再利用標準液確認濁度計讀值是否正常，如有偏差，則再進行調整確認，直至正常運作。

**Calibration Certificate**
**OEM Digital Turbidity Probe**

| | |
|---|---|
| Customer | ARC Accurate Technology Co. LTD |
| Model | NEP5000 |
| NTU ranges | 100, 1000, 5000 |
| Serial number | 107571 |
| Date of calibration | 18 July 2016 |
| Pressure test passed | Yes |

Calibration results

| Range | 0 NTU | 10 NTU | 100 NTU | 400 NTU | 1000 NTU | 5000 NTU |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Low Range | 0.01 | 10.05 | 100.05 | | | |
| Mid Range | 0.01 | 10.06 | 100.01 | 400.08 | 1000.01 | |
| High Range | 0.01 | 9.94 | 99.99 | 400.05 | 1000.15 | 5000.18 |

圖3-14 濁度計率定紀錄

(四) 流速計：

流速計於現地安裝前，透過室內水槽來控制流況進行流速計之率定，現地安裝後，再利用旋槳式流速計進行量測比對，如有偏差，則再進行調整確認，直至正常運作。

四、 維運異常處理

本計畫執行期間，監測系統發生問題、無法正常運作或設備損壞需進行汰換或更新耗材，於當日前傳真監測系統維運異常處理告知單(詳見表 3-4)，通知水保局，並與協力廠商共同討論後，分析異常原因並初步提出處理建議，排定相關時程於河道狀況許可下進行相關維護修復。

表3-4 監測系統維運異常處理告知單

| 廠商傳真者單位及姓名 | 財團法人成大研究發展基金會 |
|---|---|
| 維運異常設備 | □管式水聲計：<br>□收音麥克風□音響轉換器□金屬管<br>□壓力式水位計<br>□光學式濁度計<br>□電磁式流速計<br>□資料記錄器<br>□太陽能電力系統：<br>□太陽能充電模組□充電控制器□電池<br>□儀器小屋 |
| 異常設備處理建議 | 處理建議：<br><br>預定處理時程： 年 月 日～<br>年 月 日 |
| 廠商傳真日期： | 年 月 日 |
| 水土保持局確認收執簽名 | |
| 水土保持局確認回傳日期 | 年 月 日 |
| 水土保持局意見 | □同意備查 □不同意備查<br>□其他： |

水土保持局保育治理組
連絡電話：(049) 234-7214
傳真電話：(049) 239-4307

財團法人成大研究發展基金會
連絡電話：(06) 3840251#622
傳真電話：(06) 3840260

今年度於 0823 熱帶低壓期間因強降雨導致現場儀器受損，於 9 月 11 日進行設備確認時發現現場水聲計傳輸線路遭磨蝕中斷，以及底床流速計遭磨損毀壞失去量測能力，水聲計線路當日於現場進行修復後，經過檢測確認正常運作，底床流速計則因現地固床工上難以再進行加裝儀器，故建議後續改採用非接觸式流速計進行流速量測較佳，當日回傳異常通報單如下圖所示。

| 廠商傳真者單位及姓名 | 財團法人成大研究發展基金會 陳柚婷 |
|---|---|
| 維運異常設備 | ■管式水聲計：<br>□收音麥克風□音響轉換器□金屬管<br>■傳輸線路<br>□壓力式水位計<br>□光學式濁度計<br>■電磁式底床流速計<br>□資料記錄器<br>□太陽能電力系統：<br>□太陽能充電模組□充電控制器□電池<br>□儀器小屋 |
| 異常設備處理建議 | 處理建議：<br>0823 熱帶低壓降雨事件後，於 9 月 10 日進行事件後維護，圍水確認設備狀況後，確認到管式水聲計埋設於固床工中之傳輸線路，因表面水泥遭磨蝕，使傳輸線路失去保護而遭沖斷，另電磁式底床流速計其儀器量測表面亦遭磨蝕損毀。<br>管式水聲計傳輸線路將儘速恢復，使其正常運作，並強化保護線路；電磁式底床流速計因颱風將近，進行更換工程將無法於近期完成，將待颱風過後進行修復作業。<br>預定處理時程：107 年 09 月 11 日～<br>107 年 11 月 11 日 |
| 廠商傳真日期： | 107 年 09 月 11 日 |
| 水土保持局確認收執簽名 | 陳佳純 |
| 水土保持局確認回傳日期 | 107 年 9 月 11 日 |
| 水土保持局意見 | ☑同意備查 □不同意備查 |

圖3-15 107/9/11 異常通報單

## 第三節　年度儀器維護與保養

今年度已於 1 月 30 日、2 月 27 日、3 月 23 日、4 月 24 日、5 月 24 日、6 月 29 日、7 月 23 日、8 月 30 日、9 月 27 日、10 月 31 日、11 月 21 日、12 月 12 日完成定期維護作業 12 次，並於 6 月 29 日、7 月 10 日、8 月 30 日、9 月 11 日、9 月 27 日執行事件後維護，共計 14 次維護，相關維護時間詳列於表 3-5，今年度監測至目前共遭遇 5 次事件，分別為 0613 豪雨、0619 豪雨、0702 豪雨、0823 熱帶低壓以及山竹颱風，相關維護與降雨事件時間軸詳見圖 3-16。

表3-5　現地維護時間

| 項次 | 定期維護時間 | 備註 | 項次 | 事件後維護時間 | 備註 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 107/01/30 | | 1 | 107/06/29 | 0613 豪雨、0619 豪雨後維護(水位計及濁度計有淤埋情形) |
| 2 | 107/02/27 | | 2 | 107/07/10 | 0702 豪雨後維護(水位計及濁度計有淤埋情形) |
| 3 | 107/03/23 | | 3 | 107/08/30 | 0823 熱帶低壓後維護(確認水聲計與流速計訊號，檢測水位計、濁度計) |
| 4 | 107/04/24 | | 4 | 107/09/11 | 0823 熱帶低壓後維護(確認水聲計與流速計故障) |
| 5 | 107/05/24 | | 5 | 107/09/27 | 山竹颱風後維護(確認水聲計訊號，檢測水位計、濁度計) |
| 6 | 107/06/29 | | | | |
| 7 | 107/07/23 | | | | |
| 8 | 107/08/30 | | | | |
| 9 | 107/09/27 | | | | |
| 10 | 107/10/31 | | | | |
| 11 | 107/11/21 | | | | |
| 12 | 107/12/12 | | | | |

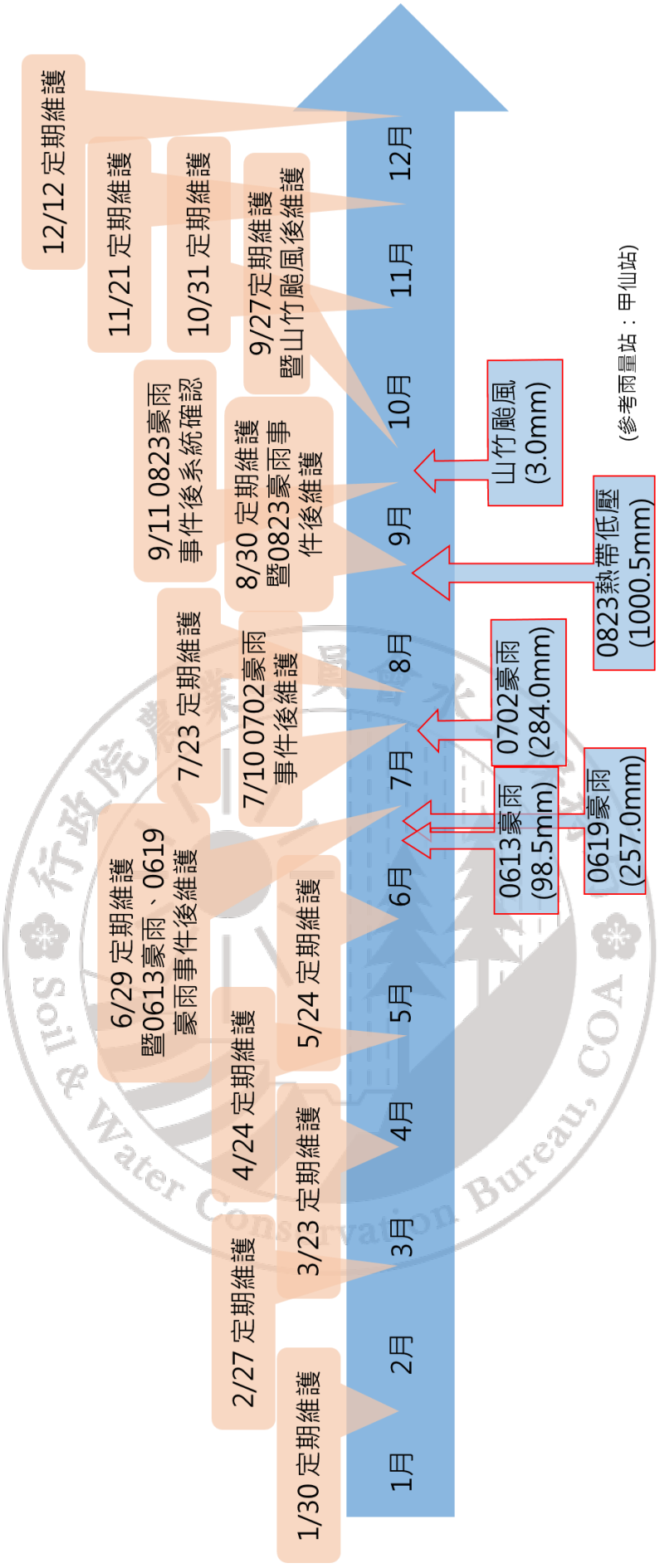


圖3-16 107 年度維護與降雨事件時間軸

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

現場監測設備持續運作紀錄，並完整記錄到今年度五次降雨事件，(1)今年度水聲計之鋼管因改善強化其厚度，至目前事件後維護檢查尚未出現管壁凹陷或破損之情形，唯枯水期時維護需注意水垢與水草的清理，如圖 3-17 所示，(2)底床流速計於記錄過程中仍易受土砂覆蓋影響量測數值，但因影響區段可透過流速前後紀錄與水位進行修正，故仍能獲取完整事件的流速變化，(3)水位計及濁度計因位於河道右岸，於降雨事件中的退水階段易受泥砂沉降堆積影響，導致濁度計量測數值異常，因此事件後維護對此監測站的水位計與濁度計較為重要，如圖 3-18。



圖3-17 水聲計金屬管表面清理前後照片（107/2/27）



圖3-18 清理水位計、濁度計保護管內淤積土砂（107/7/10）

# 第四章　河道底床載監測示範站之補強與改善

依據前期計畫成果及現地監測執行經驗，針對現地各式監測設備於颱洪期間遭遇土砂淤埋、撞擊、沖刷造成儀器損壞之問題，提出補強與改善對策。

## 第一節　106 年度遭遇問題

106 年度於尼莎颱風及海棠颱風後，水聲計所使用之金屬管，受底床載之土石撞擊，因強度不足而出現凹陷，甚至於破損之情形，如圖 4-1 所示，之後為提升金屬管強度，選用厚度較大之金屬管來獲取較佳的環境耐受度。



圖4-1 水聲計金屬管凹陷情形（106/8/16）

106 年度監測期間，水位計裝設於河道右岸，常因河道水位不足未能獲取平時的水位資料，另在降雨事件過後，常受土砂淤積影響量測數值，在過往照片紀錄中(如圖 4-2)發現，民國 98 年至 106 年間此區域河道左右岸並無固定堆積位置，故為降低土砂堆積影響，於河道左岸加設水位計來獲取平時水位資料，並可與現有水位資料互補及比較正確性。

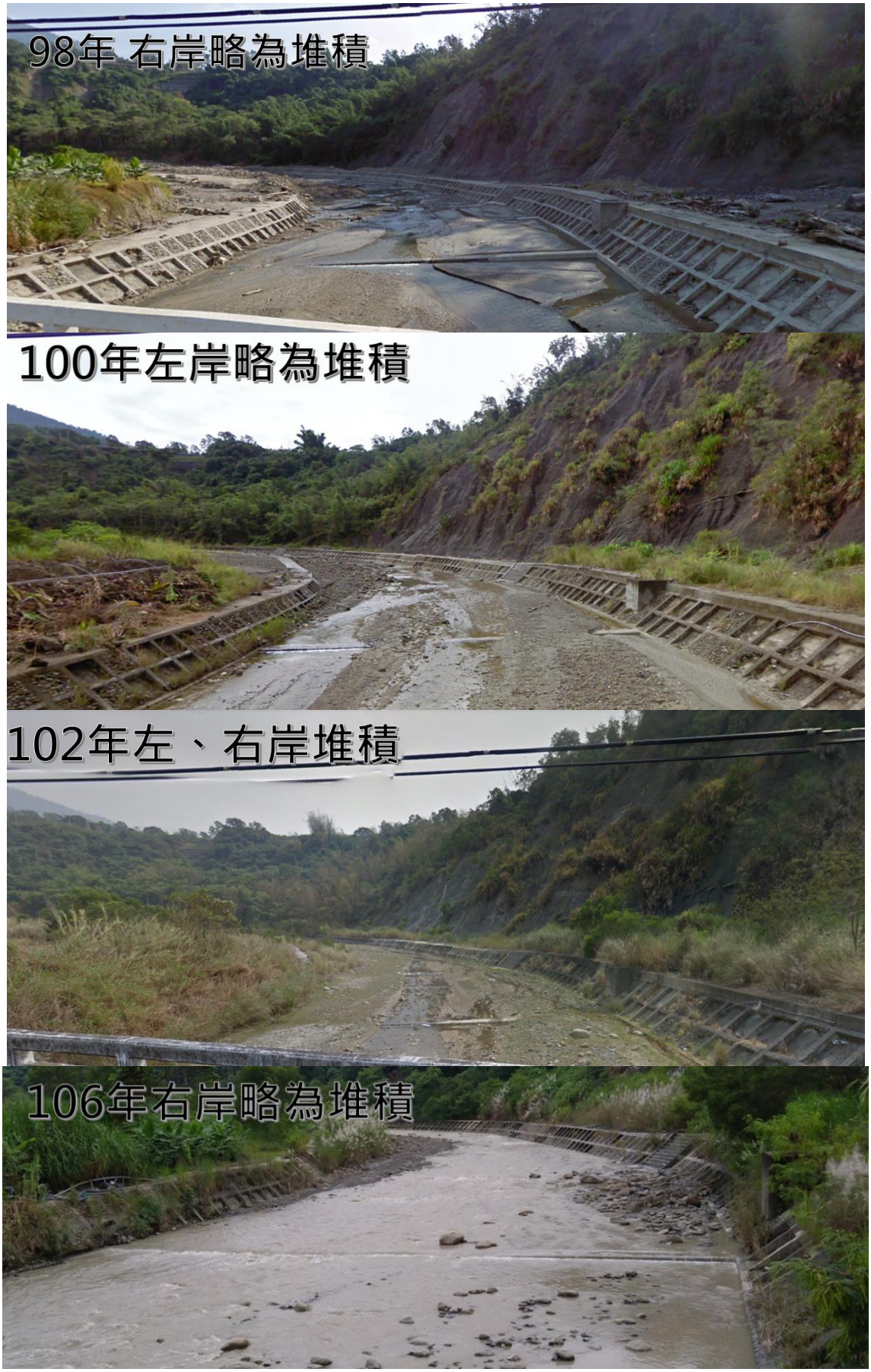


圖4-2 不同時期慈恩橋上游土砂堆積情形（資料來源：前期計畫、GOOGLE道路街景）

105 年度河道土砂流出監測示範站設置後，到 106 年經過數次降雨事件後，設置於河道中的監測儀器所使用的傳輸線路保護管，出現部分鏽蝕痕跡（如圖 4-3），為避免於之後的降雨事件中，因鏽蝕導致被土砂破壞，決定將保護管更換為不鏽鋼管，減少長期浸於水中之影響。

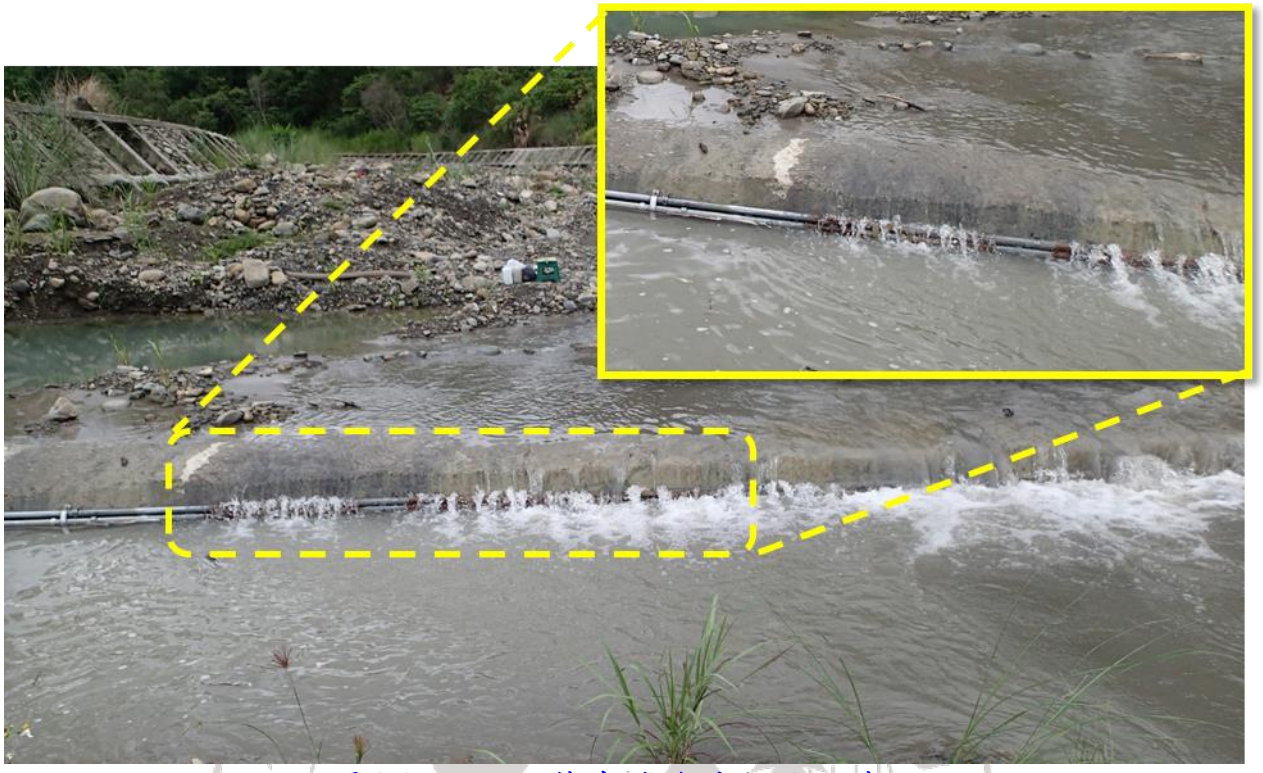

圖4-3 鍍鋅鐵管事件後外觀鏽蝕情況

Soil & Water Conservation Bureau, COA

## 第二節　補強與改善措施

一、水聲計強化改善

前期 3.0 釐米厚金屬管（SUS304）於事件後因受撞擊而產生凹陷，為增加水聲計之金屬管承受撞擊能力，透過更換相同材質（SUS304）、相同內徑且厚度 7.5 釐米之金屬管取得較佳之承受撞擊能力，金屬管內外徑差異如圖 4-4 所示，於 106 年 10 月 24 日更換後（如圖 4-5）則依第三章第二節中所述方法重新進行校調，並確認水聲計監測資料可匯入記錄器穩定運作，以供後續現地試驗及監測進行分析，經歷今年度強降雨事件現場確認水聲管無凹陷之情形發生（如圖 4-6），採用 7.5 mm 厚金屬管，足以承受現地土砂顆粒之撞擊。

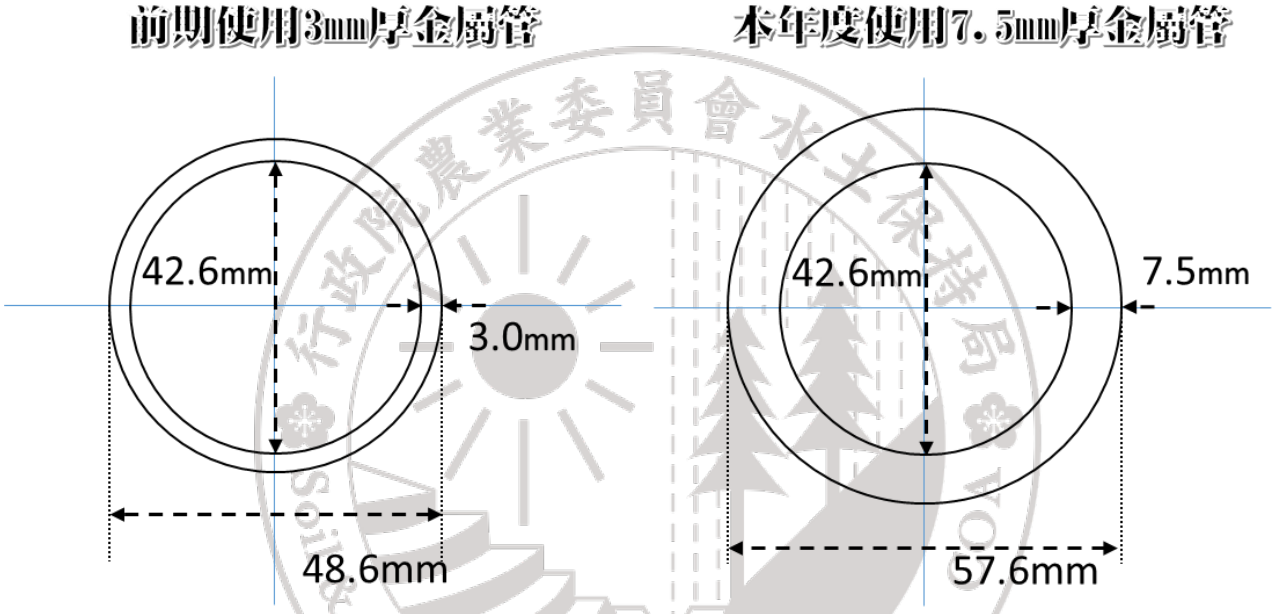


圖4-4 不同厚度金屬管示意圖



圖4-5 7.5mm 厚金屬管之管式水聲計裝設後照片




圖4-6 7.5mm 厚金屬管之管式水聲計 107 年度汛期前後狀況

二、水位計及濁度計改善

現設置水位計位置於河道右岸，106 年度監測受到事件後受泥沙淤積影響，回顧前期及相關計畫圖資，可知慈恩橋上游土砂堆積情形，並無固定於特定區域堆積（如圖 4-2），為免資料中斷或資料品質疑慮，於 107 年 5 月 3 日於對岸相同位置（左岸）加設 1 組自計式水位計（如圖 4-7），避免單一處水位計受淤埋影響而丟失資料，並比對是否受彎道效應而有水位差之情形，以供後續分析之用。

於今年度 0613 豪雨中因現場施工圍水，右岸水位計未能接觸水面，透過新裝設之左岸水位計，量測到現場水位對雨量之變化關係，如圖 4-8。



圖4-7 河道左岸加設水位計(107/5/3)

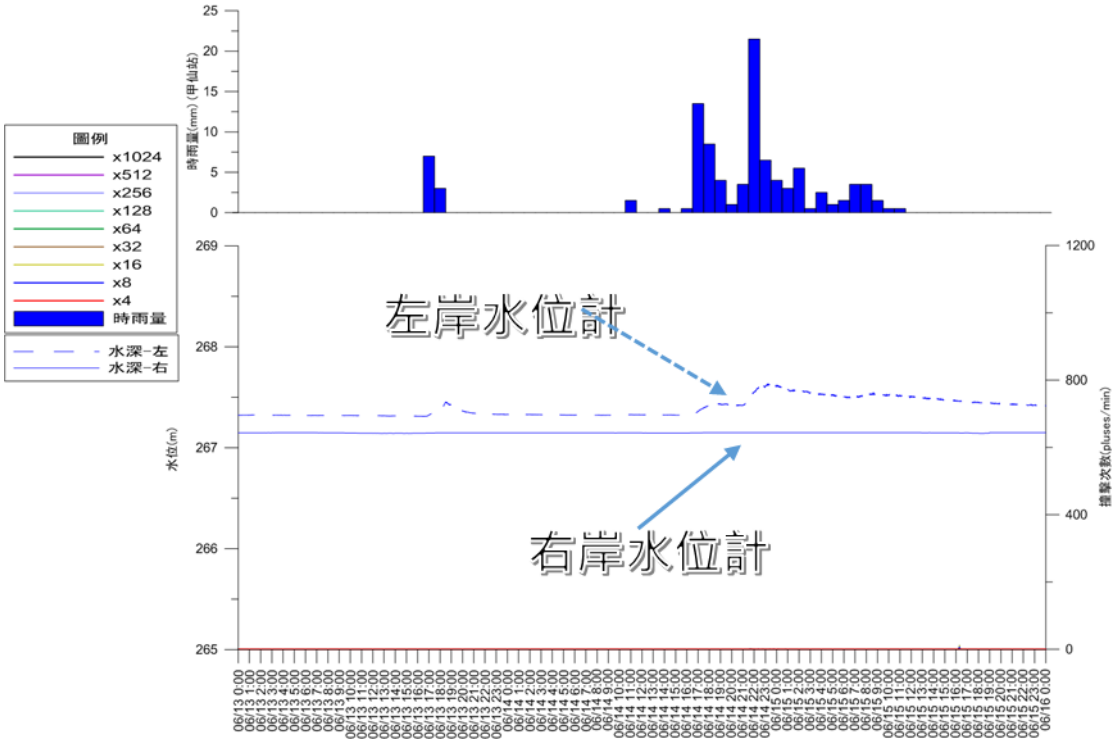


圖4-8 0613 豪雨-右岸水位計與左岸水位計之比較

現場水流濁度於事件中在目前監測成果顯示已超出濁度計量測上限，故並無法確認推估懸浮土砂量，目前嘗試於事件中進行取樣，補充事件過程中，濁度計遭土砂淤積，而無法監測缺少數據，並將持續觀察提出更佳之改善方式，另本案中濁度計主要作為確認河道水流濁度與水聲計反應是否正確，如在水流低濁度期間出現大量撞擊反應，則可能為異常訊號或外在干擾。

三、電力及傳輸線材之保護管強化

現管式水聲計、底床流速計訊號及電力傳輸線由鍍鋅鐵管包覆保護，固定於固床工下游側，由河道中間拉設置側岸，沿側岸佈設接入儀器小屋，106年監測期間保護管靠近河道中央部份外觀已有鏽蝕凹陷之情形，於106年10月24日更換保護管為304不鏽鋼管，更換長度約15公尺，加強保護性及防止鏽蝕情形發生，歷經今年度數場事件後於9月11日觀察保護管現況，未見鏽蝕情形（詳見圖 4-7）。




圖4-9 傳輸線路保護管更換為不鏽鋼管後(107/9/11)

# 第五章　設置河道底床載直接式量測裝置

由於現地試驗及室內實驗條件限制，較難取得較高流量條件下之底床載輸砂量，配合現地河道底床載直接式量測裝置取得較高流量條件下之底床載輸砂量之驗證資料，以完善水聲計底床載輸砂關係曲線，首先進行國內、外文獻及執行計畫回顧，分析比較後擇定較適合之直接式量測裝置，於本年度設置，並針對直接適量測設備維護清理方式進行說明。

## 第一節　直接式量測裝置評估

蒐集國內外地床載直接量測裝置設置文獻、計畫，並分析其於甲仙示範站之適用性，擇定適用的底床載直接式量測裝置並於現地設置，以搜集現地直接式量測資料配合水聲計資料相互驗證，直接式量測設備相對間接式量測設備為利用設備直接置入河道中補抓或採樣河道土砂，常見為壓差式(pressure-difference-type)、籃式（basket-type）、槽坑式（slot-type），說明如下。

一、壓差式(pressure-difference-type)

壓差式量測設備為透過似鉛魚式流速器外型，由文獻回顧中可見各國不同造型採樣器，但主要核心為由土砂開口、囚砂裝置、穩定用尾翼 3 部分組成，外型多為流線型設計，利用水流壓力差使採樣器可貼近於河床表面，如圖 5-1 所示，此方法較適用於多砂河床，相關研究成果列於表 5-1。

使用方式為利用採樣器本身重量或加掛載重使沉入河道底床中，透過面對上游面土砂開口採取底床載土砂，採樣土砂除以採樣時間可得到底床載輸砂量，可於單一事件期間多次進行採樣，量測不同粒徑之底床推移載（砂或礫石河川）其量測儀器除大小有所差異，其原理與與形狀皆大同小異，其量測方式可分為小型儀器可由人工手持，大型儀器則需吊車或其他方式懸吊垂降入水中。

Kleinhans & Brinke(2001)利用 Helley-Smith 式量測設備觀測紐西蘭的 Waal River，其平均流量為 1350 CMS，尖峰流量則達到 8000 CMS，底床載的

粒徑範圍為 0.25 mm～76.2 mm，Erskine 等人（2011）亦同樣利用 Helley-Smith 式採樣器於澳洲 East Alligator River，Helley-Smith 式量測設備如圖 5-2。不同形式採樣器常見還有 Canada 礫石型底床推移載採樣器（如圖 5-3），取樣總重可達 75 kg，以及 Koblenz（如圖 5-4）、MÜHLHOFER 式（如圖 5-5）採樣器，以及中國劉德春(2003)應用 AYT 型採樣器於長江朱沱水文站進行量測(如圖 5-6)。

壓差式量測設備優點為具有較高機動性，同一事件中可進行多次採樣，但缺點亦因為維持機動性，其設備通常相對來得小型，所能採樣土砂量也較小，依據所應用河道之粒徑分佈不同，粒徑越大之區域須應用越大型之設備，小型設備可用人力進行採樣，部份較大型採樣器之設備仍須配合機具（吊車等）懸吊安裝，另外於高流量期間人工或機具放入水中，可能有流速較大而無法貼近底床，或前方土砂開口無法正對上游面，將有土砂是否具代表性，及水流衝擊力較強使設備向下游拖曳而造成危險之疑慮。

表5-1 壓差式底床載量測設備基本資料表

| 類型 | 儀器類型 | 量測範圍 | 應用地點 | 文獻時間 | 優/缺點 |
|---|---|---|---|---|---|
| 壓差式 | Helley-Smith | 粒徑範圍 76.2mm~0.25mm 尖峰流量可達 8000CMS | 紐西蘭 Waal river | Kleinhans and Brink（2001） | 可重複取樣/開口較小、高流量期間不易固定於底床 |
| | 專採細顆粒之 Helley-Smith sampler | 粒徑範圍 0.147～4.75mm 採樣總重可達 75.8 公斤 | 加拿大 Fraser River | Rennie 等人（2002） | 可重複取樣/開口較小、高流量期間不易固定於底床 |
| | Helley-Smith sampler | 粒徑範圍 0.2~76mm | | | |
| | Canada 礫石型 | 採樣總重可達 75 公斤 | | | 可重複取樣/高流量期間不易固定於底床 |
| | Koblenz | | | 1992 | 可重複取樣/採樣量體較小、重量較輕，高流量期間較不適用 |
| | MÜHLHOFER | | | 1992 | 可重複取樣/採樣量體較小、重量較輕，高流量期間較不適用 |
| | AYT | 流量 10,000~36,000cms 流速 1.7～3.8m/s 水深 9~21m | 中國（長江） | 劉德春,2003 | 可重複取樣/山區河川流速較高，不易固定於底床 |

註：視量測河川之粒徑而採不同大小之採樣器，表中僅列文獻中實際應用地點之量測成果範圍

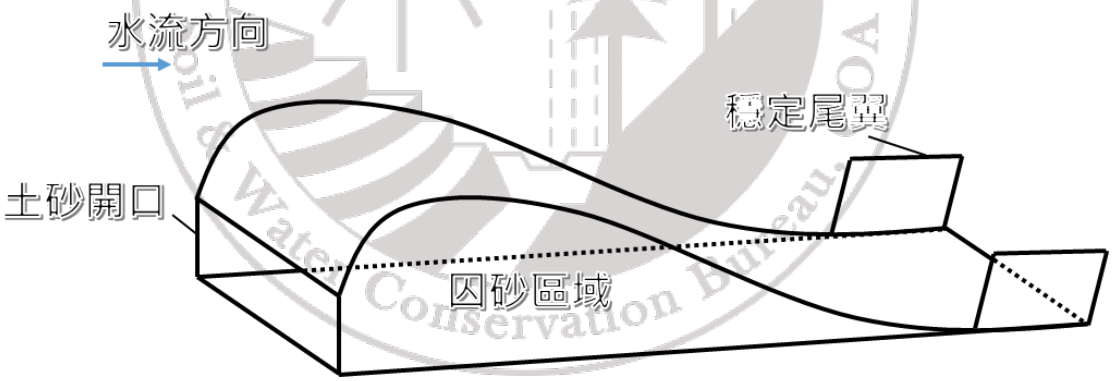


圖5-1 底床載採樣器主要概念設計圖



圖5-2 Helley-Smith 底床推移載採樣器

（資料來源：Erskine等人,2011）




圖5-3 Canada 礫石型底床推移載採樣器

（資料來源：Course on fluvial dynamics of Dipartimento di Scienze della Terra PoloScientifico e Tecnologico, Italy）

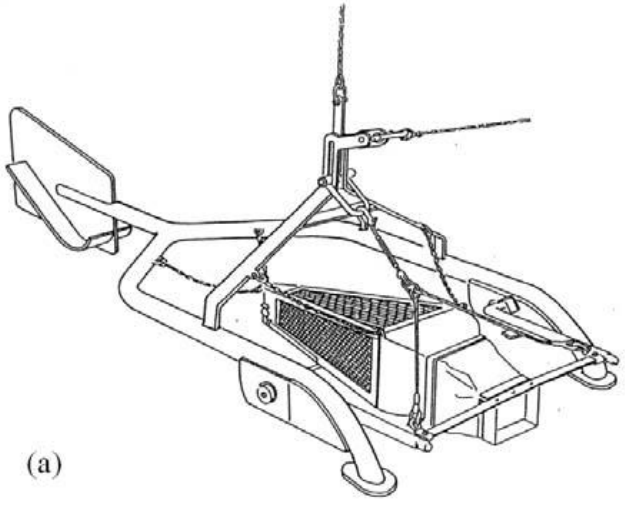


圖5-4 Koblenz 底床推移載採樣器

（資料來源：Geschiebemessungen, Leichtweiß institute, 1992）

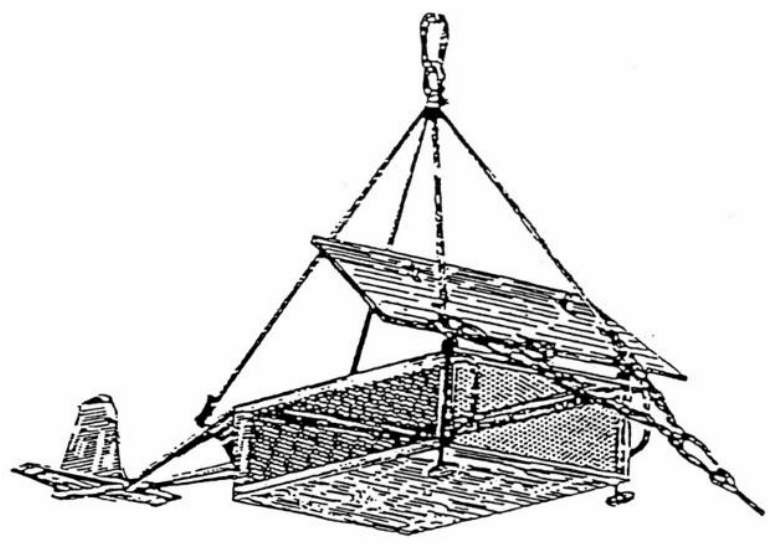

圖5-5 MÜHLHOFER 底床推移載採樣器

（資料來源：Geschiebemessungen, Leichtweiß institute, 1992）

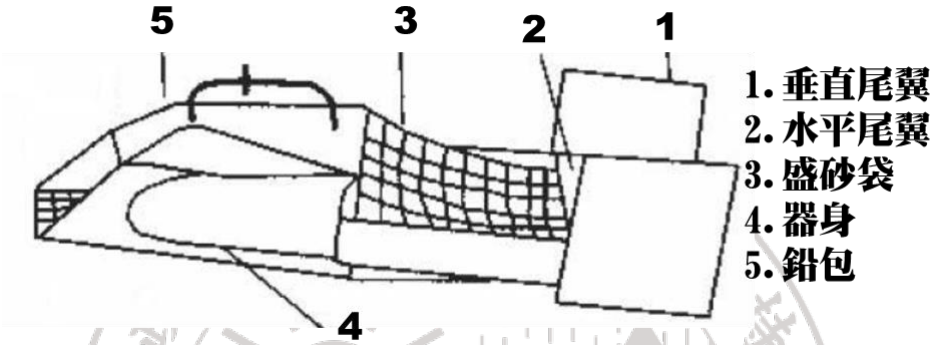


圖5-6 AYT 型底床推移載採樣器

（資料來源：川江推移质泥沙观测技术研究，2012）

二、籃式（basket-type）

利用上方開口之方形金屬籃，常設置於一定高差之防砂壩下游側，另一種則以塑膠或金屬網固定於方形金屬支架上，如同捕魚網般開口向上游測，即可直觀得到流經底床載土砂。

籃式量測設備為最常見之簡易測量設備，優點為操作直觀簡易，但其缺點為容易快速淤滿，水流稍強人力便不易操作，故多用於流量較低之流況，近年主要透過機械使其可移動，裝載較大量體土砂，於大水期間置入河道中取得底床載土砂，並可於同一事件重複進行採樣，相關研究成果列於表 5-2。

Strahlhofer（2010）文章中提到瑞士聯邦研究中心的 Erlenbach 試驗站利用可移動籃式量測設備（圖 5-7），與地聲計等設備共同量測河床底床載輸砂量，設備安裝於試驗站防砂壩下游側，利用馬達驅動沿設置之軌道移動，使籃式量測設備可受遙控進行量測，設置於一定高差之防砂壩下游側量測效果較佳，但對設置環境限制較多，所需經費亦相對較高。

表5-2　籃式底床載量測設備基本資料表

| 類型 | 儀器類型 | 量測範圍 | 應用地點 | 文獻時間 | 優/缺點 |
|---|---|---|---|---|---|
| 籃式 | 可移動式 | 金屬籃尺寸 1.5*1.5*1.5 公尺 | 瑞士 Erlenbach | Strahlhofer（2010） | 同一事件內可重複取樣、取樣方式簡易＼環境限制較多、造價較高、受底床載直接撞擊 |
| | USFS | 粒徑範圍 4～90 mm | 美國 | USDA(2007) | 設置簡易、機動性高/採樣量體較小、重量較輕，高流量期間較不適用 |
| | 台灣自行研發 | 最大採樣重量 200kg<br>可承受最大流速 4.8m/s<br>可測量流速 1.8m/s<br>粒徑範圍 4~280mm | 台灣 (筏子溪) | 許少華,2010 | 高流量期間可固定於底床/單一事件難以進行重複量測 |

註：視量測河川之粒徑而採不同大小之採樣器，表中僅列文獻中實際應用地點之量測成果範圍



圖5-7 可移動籃式量測設備(Rickenmann et al., 2010)

另外美國農業部山地科技中心（United States Department of Agriculture, Forest Service, Stream System Technology Center）亦有利用 USFS 型採樣器，主要由地面固定架、金屬支架、囚砂網三部份組成，常見之 USFS 式囚砂網式監測設備為開口為長 30 公分、寬 22 公分組裝式金屬支架，如圖 5-8，土砂粒徑範圍可透過調整網目大小，調整攔阻土砂粒徑範圍，建議使用粒徑範圍介於 4 至 90mm，優點為可以人力進行設置，造價較低，但其缺點為不適用於高流量條件下、及河道變動劇烈之河段量測，另外因設置固定於河床，無法以懸吊方式回收，意即無法像前述採樣器多次進行測量。



圖5-8 美國農業部溪流科技中心 USFS 型採樣器

（資料來源：Guidelines for Using Bedload Traps inCoarse-Bedded Mountain Streams，United States Department of Agriculture,2007）

近年亦有改良後之籃式量測設備（許少華，2010 年），見圖 5-9，利用鋼筋將設備固定於河道，使前方土砂開口可固定面對上游，減低高流量下水流衝擊對設備之影響，前方開口可利用遙控開啟及關閉，並有重量感知器（load cell）以得知囚砂容量變化情形，透過遙控前方開口開啟及關閉，可較得到準確採樣時間，並有效減少底床載超過囚砂容量而低估輸砂量之情形，以採取底床載土砂，其最大採樣重量為 200 公斤，所能取得粒徑最大至 280mm，優點可應用台灣礫石河川，可控制採樣時間，但其缺點亦因為固定於河床，同一事件內如水位高漲條件下則難以回收採樣器，再次採樣。



圖5-9 改良式籃式量測設備（許少華，2010）

（資料來源：台灣地區小型河川底床推移載泥砂傳輸量測儀器計畫-以筏子溪為例(2/2)，2010）

三、槽坑式（slot-type）

槽坑式主要以方形箱體（常見為水泥箱體）作為囚砂箱之量測設備，於河道挖取合適大小，將其埋設於河道中，其上方開口與河道表面水平，其表開口利用金屬板遮蓋，留下合適之開口大小，一般介於 10～40 公分，視河床粒徑大小決定，如圖 5-10 所示，使其能裝載較長時間、大量之土砂，相關研究成果列於表 5-3。

使用方式於事件前將儲砂空間清空，待事件後利用人力或機具挖取箱內土砂材料，所得土砂重量除以事件時間即為底床載輸砂量，其優點為受流量大小變化影響較小，高流量下仍可作用，土砂容量較大，可獲取較長時間之平均輸砂量，底床推移載進入的先後可事後加以分別篩分析，可進一步分析洪水事件過程中較細部的底床載移動過程，其缺點為難以取得短時間內連續資料，以及如事件期間囚砂量已達最大容量，土砂難以進入囚砂設備，使所量測底床載土砂量則有低估之疑慮。

故囚砂箱後續應用除本身箱體為加設其他設備輔助，取得連續之測量資料，Reid 等人（1980）利用囚砂箱應用於土耳其，為得連續之監測資料，於箱體內部加設枕型壓力計，並於 1997 年於以色列設置一全斷面囚砂箱設備進行監測（圖 5-11），並測試囚砂箱開口尺寸對所採得土砂材料之影響，利用壓力計所得總重量扣除水體重量得到箱體內連續之土砂重量，藉此得到連續底床載輸砂量，蘇重光（1985）亦利用 4 個重量感測器置於金屬平板下，於室內實驗測試直接量測底床載重量。

日本近年則主要以 Reid 等人方法設置囚砂箱，Itoh 等人（2015）於日本岐阜(京都大學穗高觀測所)設置安裝，如圖 5-12，並於囚砂箱下安裝荷重計，除可得到直接量測之底床載土砂粒徑分佈外，並可取得連續分析資料，囚砂箱位置安裝於水聲計下游側，其所得資料即為通過水聲計之底床載土砂，可供水聲計率定驗證之用，唯事件後清理維護需要較多人力及機具應用。

表5-3 槽坑式底床載囚砂箱基本資料表

| 類型 | 儀器類型 | 量測範圍 | 應用地點 | 文獻時間 | 優、缺點 |
|---|---|---|---|---|---|
| 囚砂箱 | 囚砂箱+荷重計 | 河川平均粒徑 4mm<br>箱體尺寸<br>0.45*0.45*0.45cm<br>可連續量測 | 土耳其 | Reid 等人（1980） | 採樣量體較大，可取得連數資料、淤滿後無法取得連續資料 |
| | 雙乘數式河床推移載採樣器 | 粗卵石顆粒<br>19.6~72.7mm<br>僅進行室內實驗 | 台灣室內實驗 | 蘇重光（1985） | 可取得連續資料 |
| | 囚砂箱+荷重計 | 全斷面設置<br>400mm、700mm 開口尺寸囚砂箱 | 以色列 | Reid 等人（1997） | 採樣量體較大，可取得連數資料、淤滿後無法取得連續資料 |
| | 囚砂箱+荷重計 | 全斷面設置 110、165mm 開口尺寸囚砂箱<br>測得最大粒徑<br>167mm | 以色列 | Bergman 等人（2007） | 採樣量體較大，可取得連數資料、淤滿後無法取得連續資料 |
| | 囚砂箱+荷重計 | 箱體 1*2*0.6m<br>開口為 0.2＊2m | 日本足洗谷 | Itoh 等人（2015） | 採樣量體較大，可取得連數資料、淤滿後無法取得連續資料 |

註：視量測河川之粒徑而採不同大小之採樣器，表中僅列文獻中實際應用地點之量測成果範圍

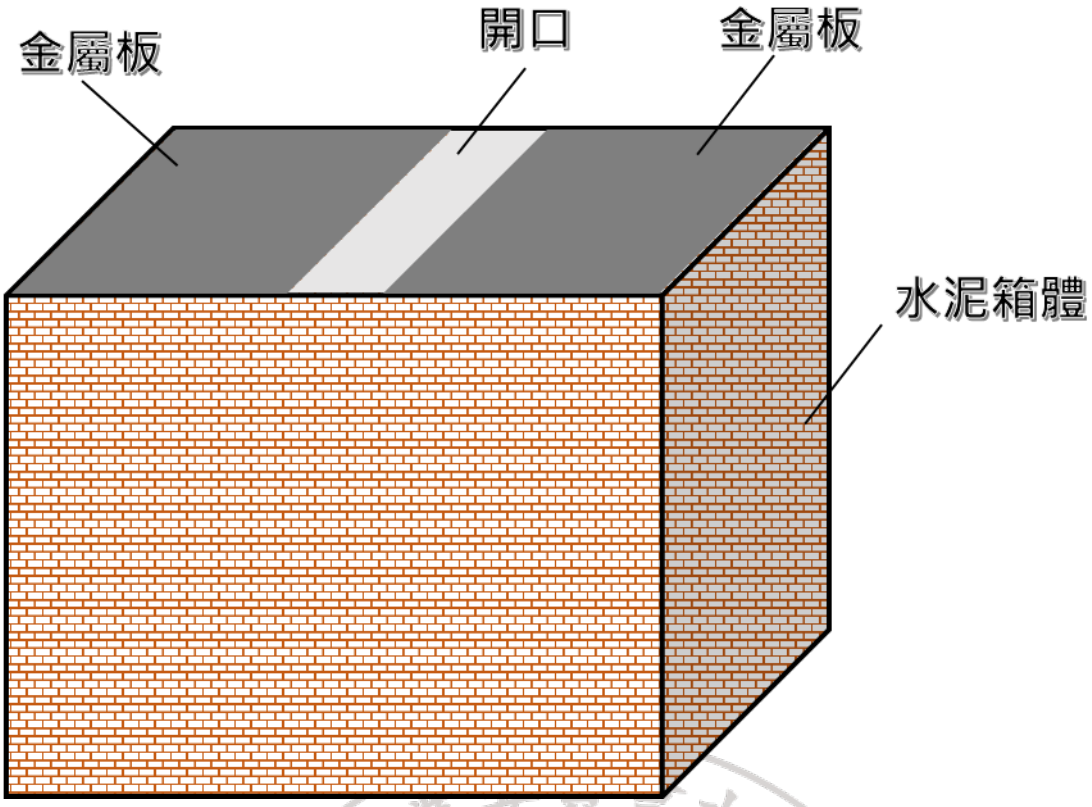


圖5-10 底床載囚砂箱主要概念設計圖

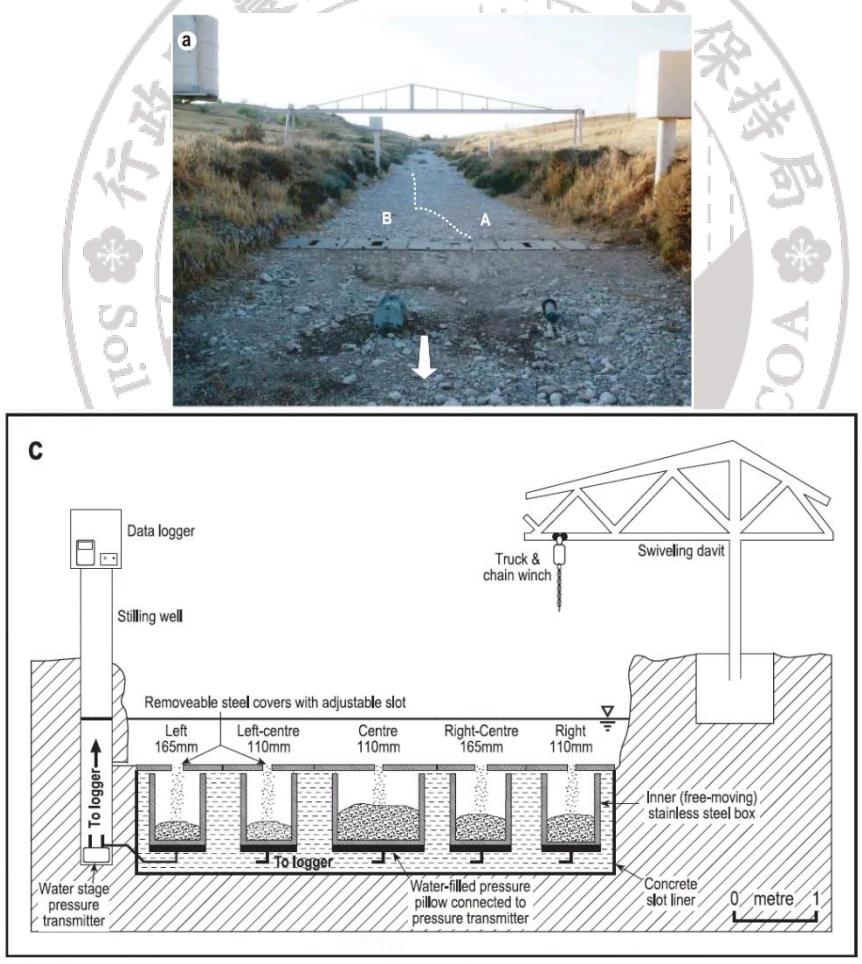


圖5-11 以色列全斷面囚砂箱試驗（Bergman 等人,2007）



圖5-12 日本穗高觀測所囚砂箱外觀與挖取土砂

本計畫於上述設備中擇定 1 款設備於現地安裝，用以取得底床載直接量測資料，以供較高流量條件下水聲計量測數值比對之用，考慮到降雨事件中河川流量較大之情況下，以及現場環境於事件中吊掛壓差式採樣器之施行難度，評估後認為槽坑式的直接式量測裝置較適合本場址，並於期初會議提出

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

擇定於現地設置囚砂箱針對大流量下進行直接式量測，另利用籃式中的 USFS 採樣器於小流量下進行直接式量測現地測試，於 5-2 節進行槽坑式的直接式量測裝置設置作業說明。

## 第二節　直接式量測裝置設置

為配合現地管式水聲計進行底床載河道土砂流出量監測，在參考國內外許多實際應用案例後，考慮到降雨事件中河川流量較大之情況下，設置相關儀器存在許多風險，決定採用槽坑式的直接式量測裝置，於管式水聲計的下游設置一囚砂箱體，並採用鋼筋水泥結構於現地設置，相關設計尺寸詳見圖 5-13～圖 5-15，箱體尺寸設計主要參考自日本穗高觀測所之囚砂箱（長 2 公尺×寬 1 公尺×高 0.6 公尺，槽坑開口 0.2 公尺），並經過現場確認施工環境與相關工程人員討論後所設計而成。

囚砂箱體其底座頂面長 203 cm，寬 300 cm，高 50 cm，箱體內部長 203 cm，寬 100 cm，高 130 cm，兩側牆面厚度 40 cm，兩側牆面於下游開口處設置 3 cm 見方的缺口，於箱體完成鋼筋水泥結構後加裝活動閘門，以便於後續維護與箱體內部之土砂清理（見圖 5-16），另於箱體頂面規劃囚砂箱體頂部金屬保護板的固定螺絲鎖點（見圖 5-17），囚砂箱槽坑開口需考慮到現場土砂粒徑分佈曲線，設置為約 $d_{50}$ 的 10 倍大小 20 cm 寬之開口（$d_{50}$ = 20.6 mm），並於金屬保護板間設置數支橫置角鐵，避免水流於箱內捲動將土砂帶出箱體內部。

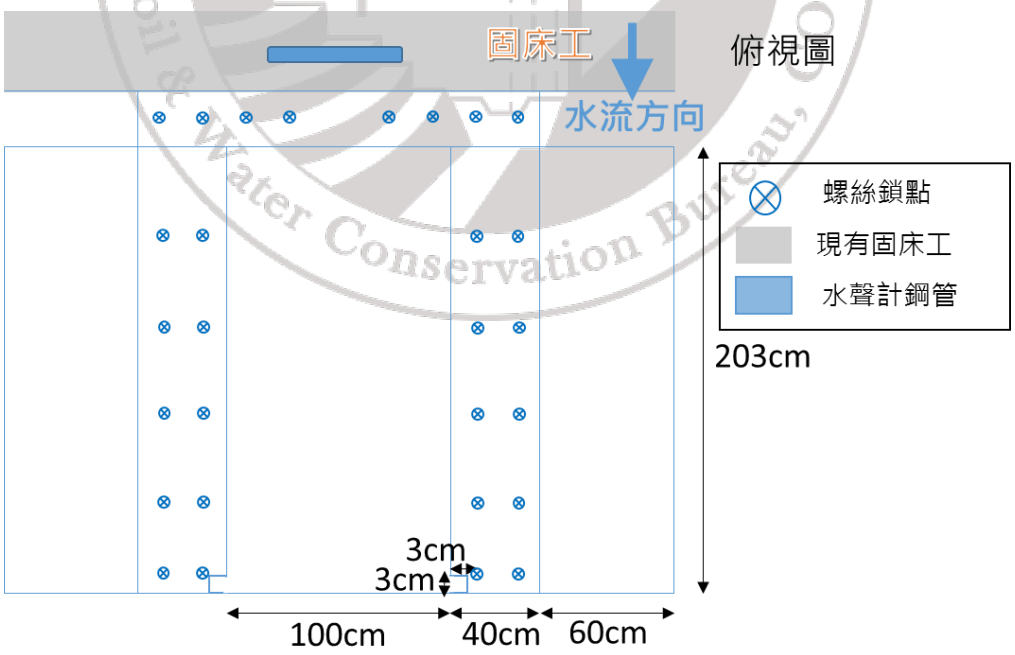


圖5-13 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體設計俯視圖

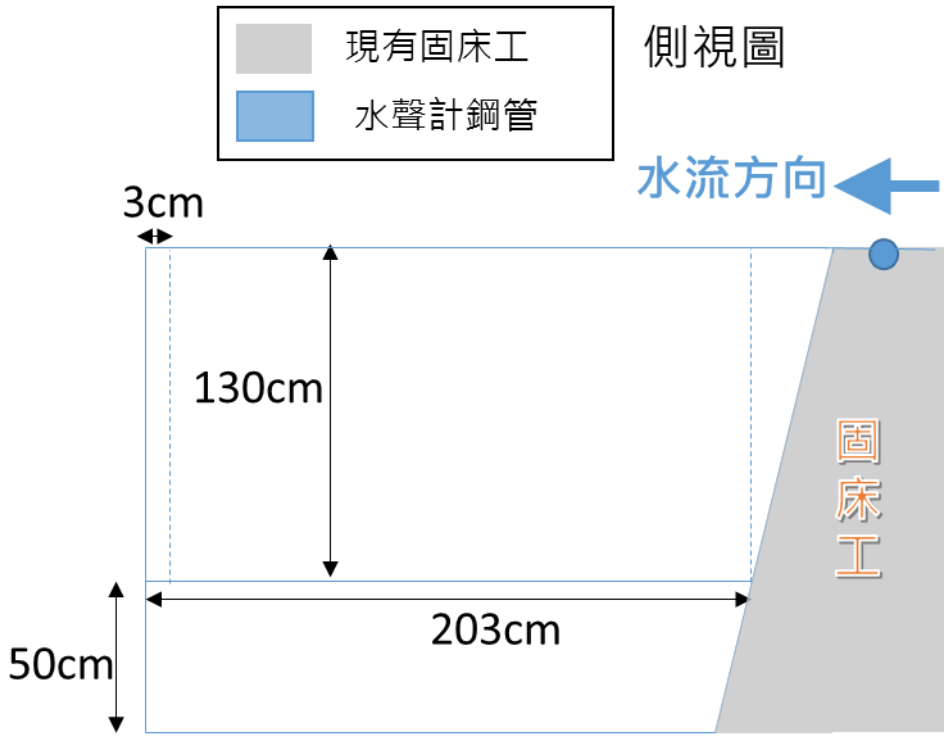


圖5-14 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體設計側視圖

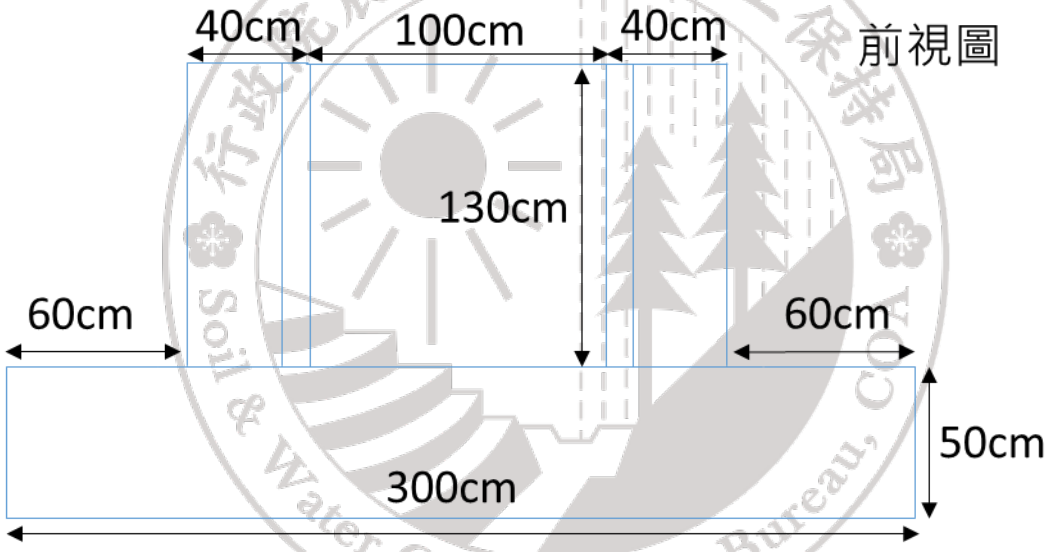


圖5-15 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體設計前視圖

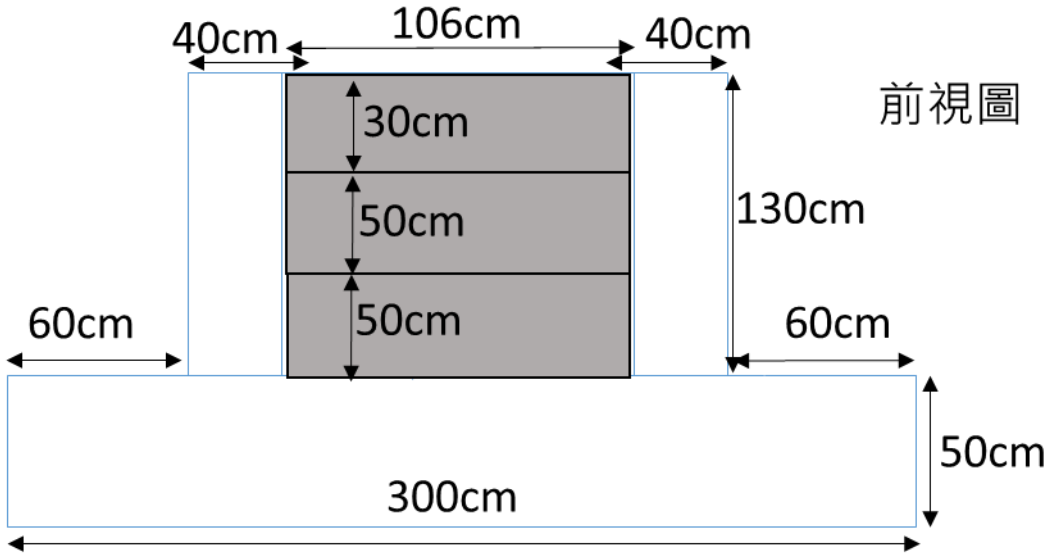


圖5-16 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體下游活動閘門設計前視圖

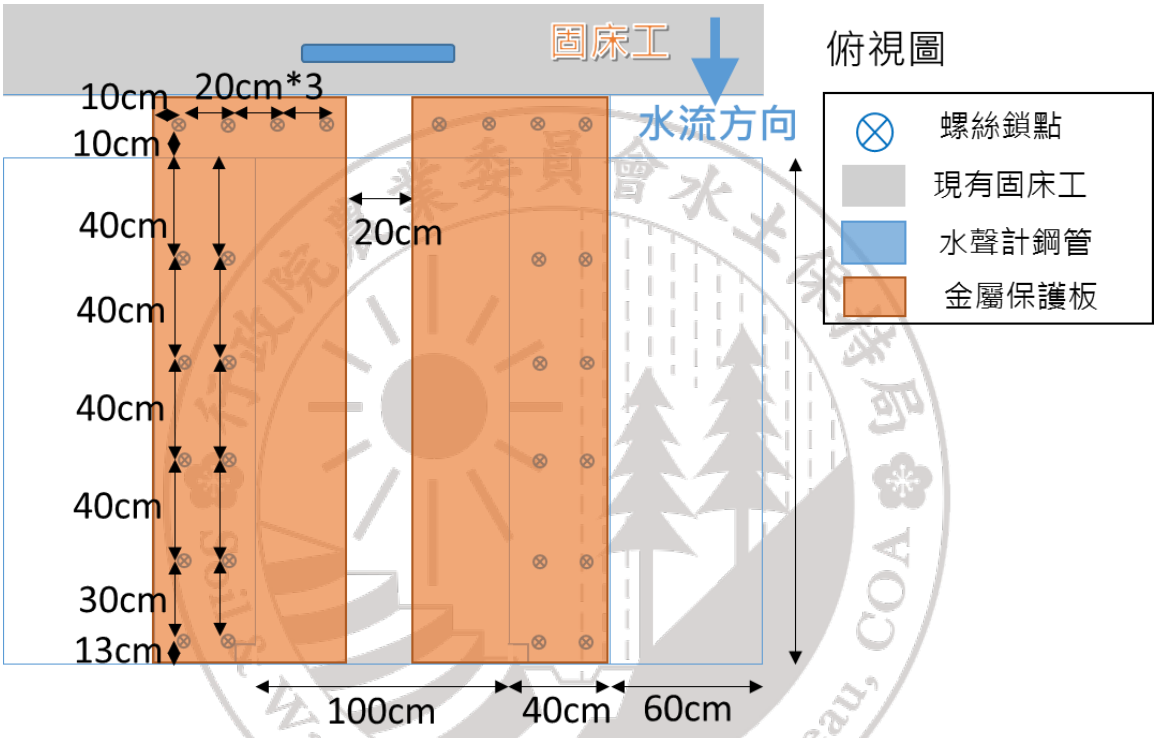


圖5-17 土砂流出監測示範站-囚砂箱之水泥箱體金屬保護板配置設計俯視圖

現地施工時因地下水位較高，需先利用機具進行導水及圍水作業，並利用抽水機減少滲水影響，如圖 5-18 所示，確認囚砂箱體設置位置後進行植筋與鋼筋結構作業，如圖 5-19 所示，確保囚砂箱體能穩固，避免被水流沖毀，完成底座灌漿作業後，進行兩側牆面以及箱體與固床工之間的結構，如圖 5-20 所示，水泥箱體結構完成後，如圖 5-21 所示，箱體頂部與下游開口側分別加裝金屬保護板與活動閘門，如圖 5-22 所示。



圖5-18 施工導水及圍水後現場狀況



圖5-19 囚砂箱體底座植筋與鋼筋結構作業



圖5-20 囚砂箱牆面結構施工



圖5-21 囚砂箱鋼筋水泥構造完成



圖5-22 頂部金屬保護板及下游活動閘門裝設

## 第三節　自動秤重系統設置

為得到囚砂箱內收集土砂之重量變化與水聲計撞擊次數配合分析之資料，於囚砂箱內部加設一自動秤重系統，此系統使用 4 個量測上限為 5 噸的荷重計，分別配置於 4 個角落進行量測秤臺上之載重總和，整個系統之最低感重為 5 公斤，並於現地安裝前進行多項測試，確認自動秤重系統於水下運作情形，相關測試內容與結果說明如下。

一、秤重系統載重試驗

於安裝前針對自動秤重系統於正常條件下進行秤重系統載重試驗，確認自動秤重系統於正常條件下之載重與測重之差異，測試過程使用共 8 個 1 噸重之標準測重鉛塊，進行加重與減重，觀察其變化情形，測試紀錄於結果詳見圖 5-23、圖 5-24，其結果顯示自動秤重系統量測反應正確，準確反應載重之重量。



圖5-23 秤重系統載重試驗

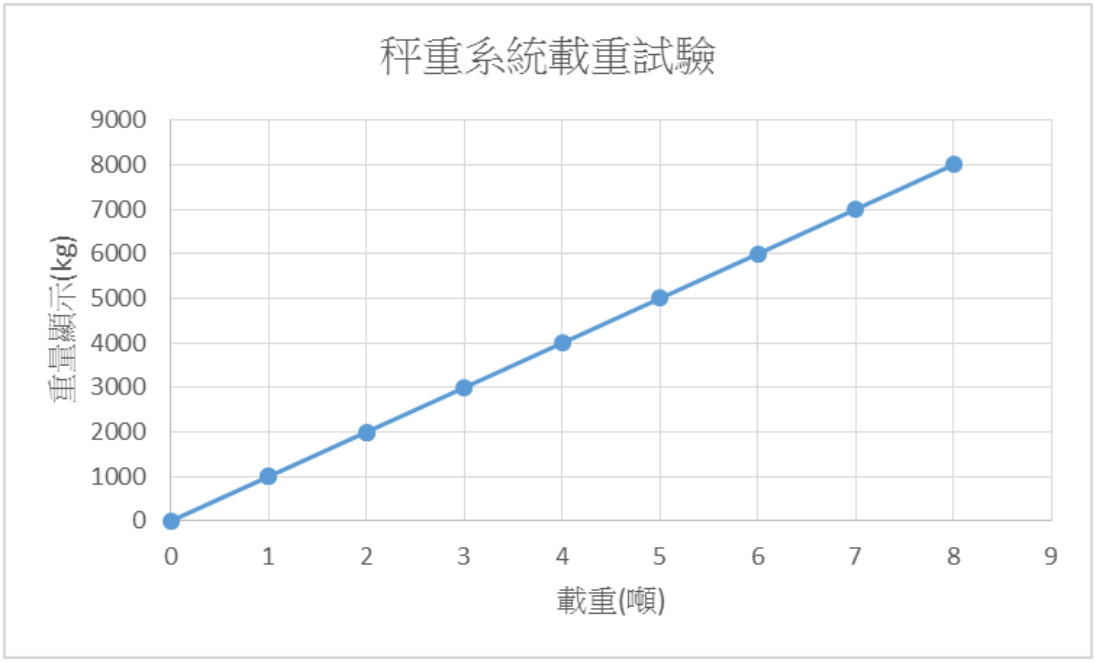


圖5-24 秤重系統載重試驗結果紀錄

二、秤重系統水中試驗

因現地裝設後自動秤撞系統將長時間浸於水中，故於裝設前針對水下載重量與測重之情形進行觀測，試驗過程使用水泥塊體，個別重量約 40 公斤，體積約 19000 立方公分，先進行載重後觀測水位變化對測重之影響，測試過程使用 15 個水泥塊體，其過程紀錄與結果詳見圖 5-25、圖 5-26，由紀錄結果發現，隨水深增加，測重因載重物體受浮力影響，而重量出現減輕之情形，透過扣除體積所受浮力之影響，認為其測重量測數值為合理數據。



圖5-25 秤重系統水中試驗-水位變化與測重試驗

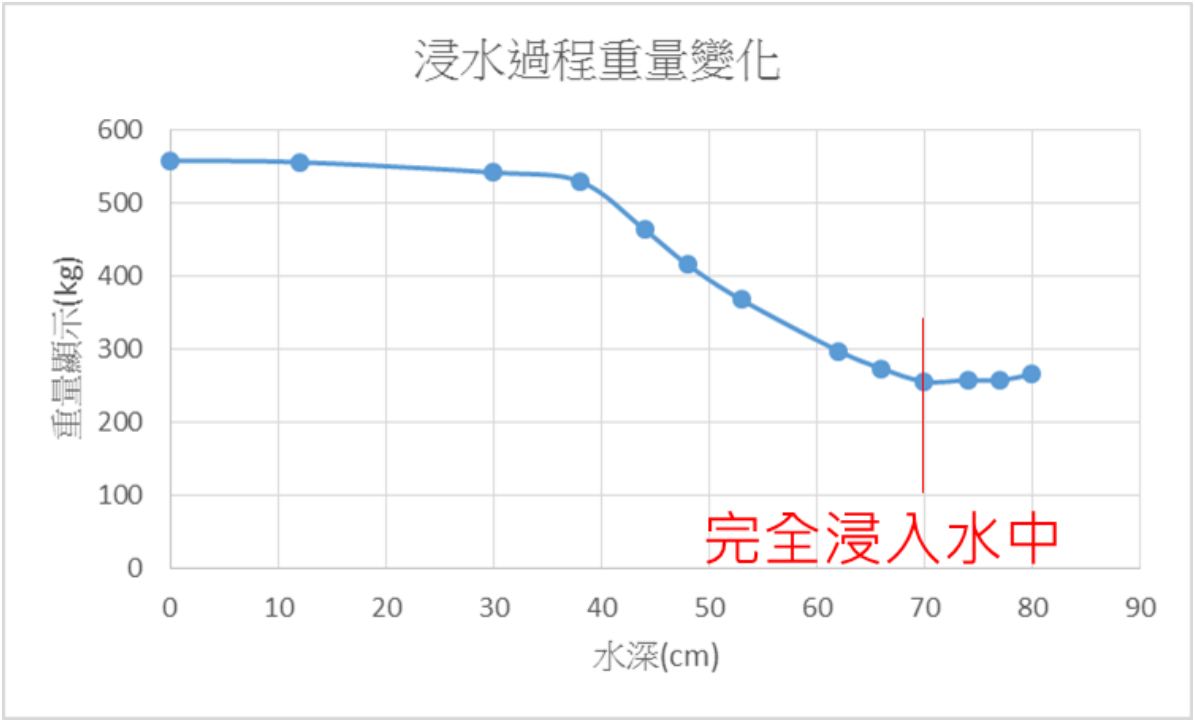


圖5-26 秤重系統水中試驗-浸水過程重量變化

為增加量測數據參考範圍，載重增加至 27 個水泥塊體，並於水中逐個取下，觀察不同重量分布是否影響測重結果，令針對 4 個角落輪流放置 4 個水泥塊體觀察，重量偏於特定角落對測重結果之影響，其測試紀錄與結果如下圖 5-27～圖 5-29 所示。

在不同重量分布下之測試觀察，其結果表現加重與減重變化狀況一致，故可認為重量分布對測重結果之影響較小，可忽略不計，而在角落偏重試驗中，於 4 個角落個別輪流設置水泥塊體，其測重結果皆相近，故認為個別角落偏重對測重結果不會產生影響。



圖5-27 秤重系統水中試驗-重量分布之影響



圖5-28 秤重系統水中試驗-角落偏重之影響

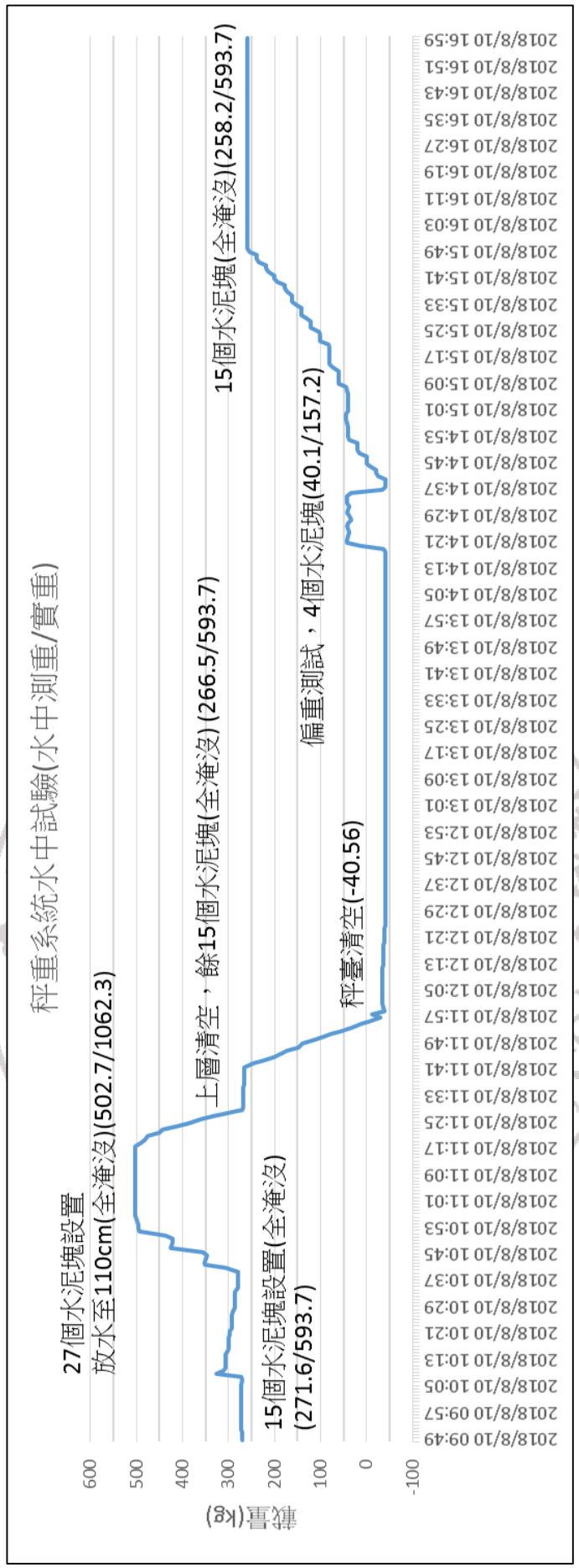


圖5-29 秤重系統水中試驗紀錄結果

三、水下耐久性測試

因設備於現地需長期浸於水中，故於裝設前進行水下耐久性測試，在秤重系統上擺設 15 個水泥塊體，於水深 100 公分之環境下觀察 3 天，觀察其載重於水下是否會發生變化，其測試結果如圖 5-30 所示，測試過程中雖測重結果有些微波動，但整體結果無巨大變化，故認為其在水中測重為穩定可信。

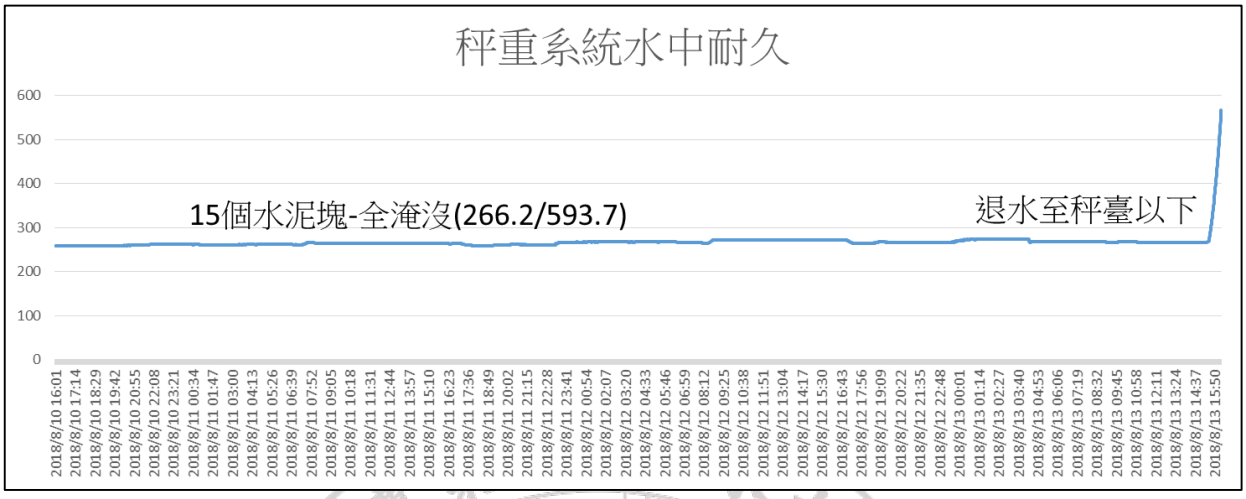


圖5-30 秤重系統水中試驗-水下耐久性

四、自動秤重系統現地裝設

裝設前測試確認此自動秤重系統於水下可正常運行且量測數據可信後，進行現地裝設，透過機具吊掛至現地囚砂箱體內部後，進行水平量測確認秤臺平穩無傾斜，如圖 5-31，之後進行秤臺固定，另為保護秤臺受土砂撞擊凹損以及避免細小土砂進入自動秤重系統影響測重結果，於秤臺上方鋪設厚度為 1 公分之橡膠墊，如圖 5-32，橡膠墊與囚砂箱壁面尚有一縫隙，為避免細小土砂灌入，利用矽膠進行封堵，待矽膠乾燥後，將矽膠與囚砂箱壁面之膠結處分開，令其可阻止細小土砂灌入下層，又不會影響自動秤重系統之量測。



圖5-31 自動秤重系統裝設水平確認



圖5-32 加裝橡膠墊緩衝土石顆粒撞擊及防止細沙灌入下層

## 第四節　事件後檢修與清理

颱洪事件後應以人工配合機具等方式進行檢修及土砂清理，維持量測功能，以利後續量測作業之進行，今年度囚砂箱完工後，遭遇 0613 豪雨以及 0619 豪雨事件後，箱體內部便被土砂顆粒堆積淤滿，於 6 月 29 日維護中透過機具圍水及導水後，如圖 5-33，進行囚砂箱內部土砂清理並進行相關粒徑分析。

移走頂部的金屬保護板後，可見表面有許多細泥填充於其中，但仍可見有許多礫石存在於箱內，如圖 5-34 所示，清除箱體上層土砂及礫石後（約 30 cm 深），如圖 5-35 所示，發現從箱體中層往下箱體內部土砂大多為細泥，已鮮少見到礫石存在（約 80 cm 深），如圖 5-326 所示，最後透過機具協助完成箱體底層細泥清除（130 cm 深），如圖 5-37 所示。

透過此次清理作業可得知，現地土砂運移於降雨事件過程中，運移土砂粒徑可能變化狀況，於降雨事件初期水流還不大時，夾帶細小土砂流進囚砂箱內，且油礦溪集水區內細砂量較多，導致箱體內部中下層收集到大量細泥，等到水流流速足以推動較大的礫石時箱體內部空間剩約一半，而最後退水階段水流再度帶來細小土砂淤積於土砂顆粒間，直至水流恢復常時流況。



圖5-33 囚砂箱清理現場進行圍水及導水



圖5-34 囚砂箱內部清理表層可見細泥與礫石



圖5-35 囚砂箱內部上層土砂清理



圖5-36 囚砂箱內部中層土砂清理



圖5-37 囚砂箱內部土砂清理完成

囚砂箱體清理時分為四層進行取樣分析，篩分析結果如圖 5-38 所示，第

一層為箱頂往下 0～30 cm，第二層為箱頂往下 30～80 cm，第三層為箱頂往下 80～110 cm，第四層為箱頂往下 110～130 cm，由篩分析結果發現此次收集之土砂粒徑皆小於 40 mm，$d_{50}$ 則皆小於 30 mm，可能原因為囚砂箱建設期間上游區段導水圍堰，將細粒土砂堆置於水聲計上游處，令事件初期土砂顆粒開始運移時，大量細粒料往下游移動，填充囚砂箱體大部分空間，導致整體土砂粒徑過小，不在水聲計量測之土砂粒徑範圍內（最小量測粒徑 4 mm）。

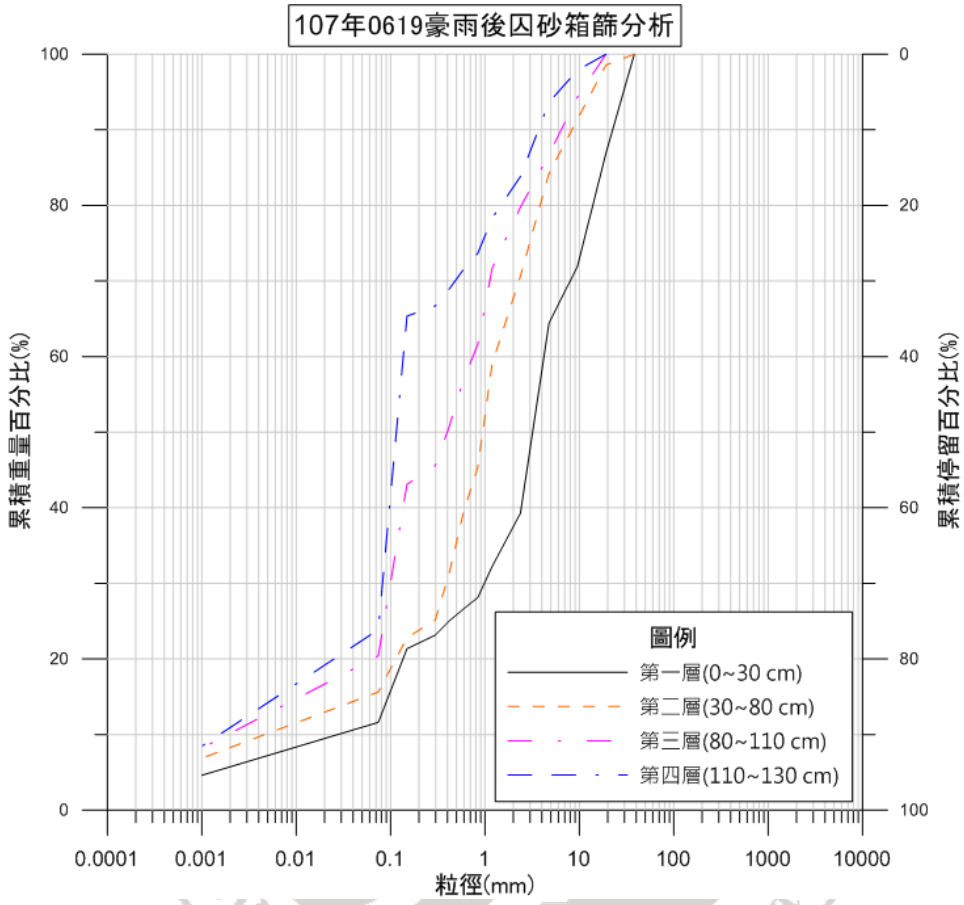


圖5-38 0619 豪雨事件後囚砂坑篩分析

0702 豪雨期間，囚砂箱再次淤滿，此次囚砂箱清理將箱內土石分為三層進行分析，篩分析結果如圖 5-39 所示，第一層為箱頂往下 0～30 cm，第二層為箱頂往下 30～80 cm，第三層為箱頂往下 80～130 cm，此次囚砂箱成果於第一層有較多細粒料存在，雖有部分較大粒徑達 180 mm，但整體細粒料比例較下面兩層多，D50 約為 0.83 mm，認為是事件後期水位降低階段造成粒徑偏小，第二層整體粒徑較為均勻，D50 約為 4.57 mm，第三層為此次事件中粒徑較大之分層，最大粒徑達 230 mm，D50 約為 9.40 mm。

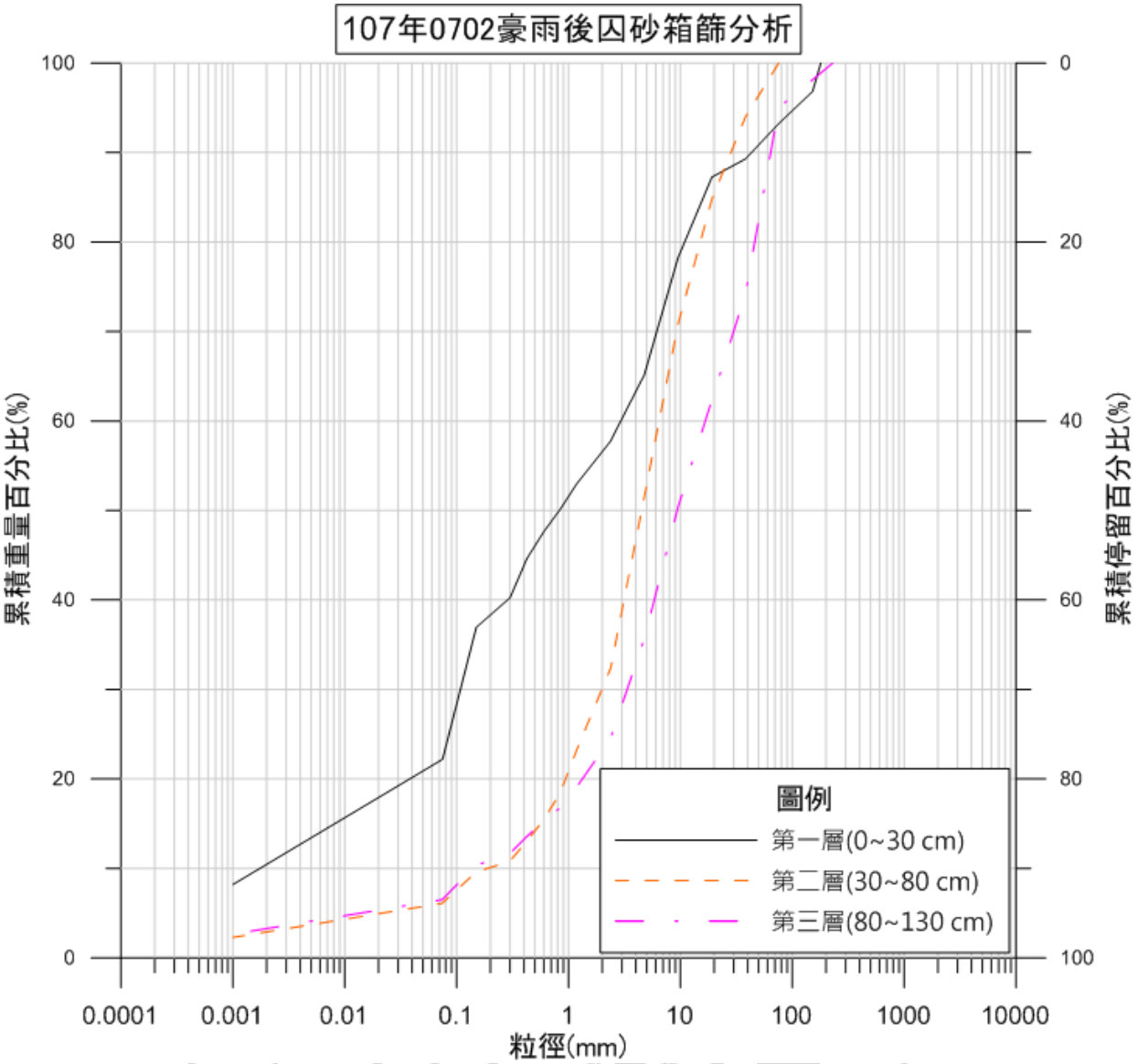


圖5-39 0702 豪雨後囚砂坑篩分析

0823 熱帶低壓期間因降雨強烈，導致水流量較大，將囚砂箱上蓋鋼板沖走，影響囚砂箱量測成果，故此次囚砂箱結果不採用。


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 第六章　河道底床載量測現地實驗

## 第一節　現地河床質採樣與特性分析

本計畫欲進行河道底床載量測現地試驗，首先需了解集水區之土砂粒徑分佈，以了解集水區土砂特性，並將採樣成果分析整理，作為後續試驗條件設計規劃之依據。

首先針對監測示範站上游進行河床質採樣，河床質採樣分析之主要目的，在於了解目前河床輸砂特性，以及河床堆積層粒徑之分布，做為土砂特性分析之重要資料，以作為後續室內、外試驗條件設計之參考，107 年度河床質採樣工作，延續前期計畫成果施做點位選擇於前期採樣位置鄰近（如圖 6-1），於水聲計鄰近河道、上游河道（油礦溪與其支流鹽桑坑匯流口之上游）2 處，樣坑基本資料如表 6-1，唯去年度河道上游進行清疏工程，為提高採樣代表性，減低工程影響於 0613 豪雨後待水流消退後，於 6 月 29 日進行採樣，透過「樣坑式河床質採樣」進行河床質採樣，今年度完成 2 處，分別於監測儀器上游約 20 公尺處，以及於油礦溪與其支流鹽桑坑匯流口上游，現場採樣照片如圖 6-2、圖 6-3，粒徑分析成果如圖 6-4、圖 6-5。

表6-1　106 年河床質採樣基本資料表

| 編號 | 位置概述 | 坐標(TWD97-TM2) | | 備註 |
|---|---|---|---|---|
| | | X | Y | |
| 106-1 號孔 | 監測儀器上游約 20 公尺處 | 208627 | 2553699 | 前期成果 |
| 106-2 號孔 | 油礦溪與其支流鹽桑坑匯流口之上游 | 209684 | 2554207 | 前期成果 |
| 107-1 號孔 | 監測儀器上游約 20 公尺處 | 208626 | 2553698 | 今年度成果 |
| 107-2 號孔 | 油礦溪與其支流鹽桑坑匯流口之上游 | 209954 | 2554460 | 今年度成果 |

採樣工作包括野外粗顆粒篩分析以及室內細粒料篩分析採用人工直接挖掘孔採取，於車輛可及之處，掘孔面積為 100 公分之正方形，深度 60 公分，並進行粒徑分析工作，其採樣方法如下：

一、 野外粗顆粒分析：

1. 使用 3" 、1½" 、3/4" 、3/8" 之方孔篩，於挖掘現場做篩分析，並秤重紀錄。
2. 大於 3" 以上之礫石，直接使用鋼捲尺量其粒徑並秤重紀錄，另紀錄本孔之最大石徑。
3. 另將通過 3/8" 篩以下之細顆粒秤重紀錄，並採四分法取 2~3 公斤。(視顆粒大小而定)
4. 細顆粒樣品經烘乾後，於室內以標準篩分別做篩分析。

二、 室內細顆粒分析

1. 將野外帶回之細顆粒樣品，經烘乾並分散土樣。
2. 採標準篩#4、#8、#16、#20、#30、#40、#50、#100 底盤等於室內做篩分析，並分別秤重紀錄。

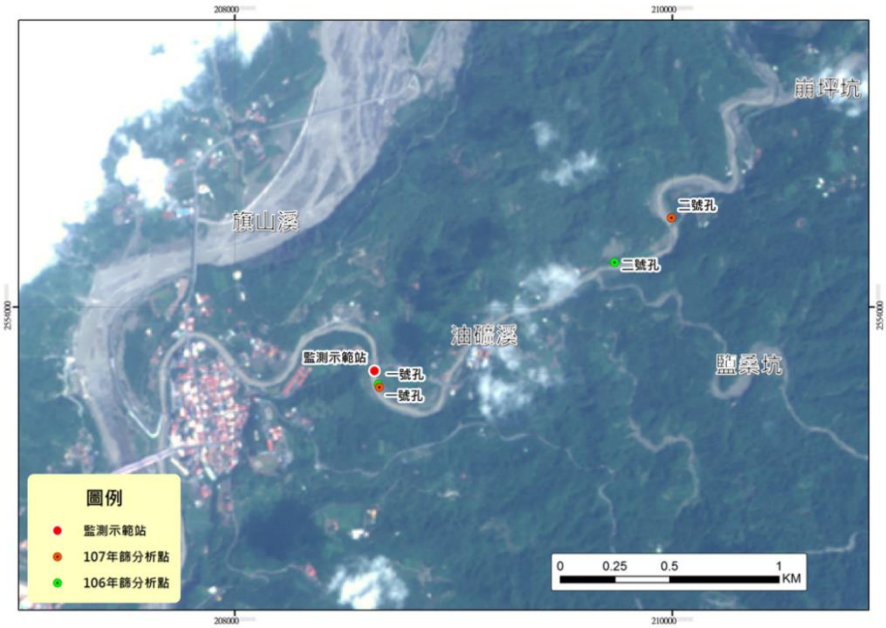


圖6-1 河床質採樣位置分佈圖



圖6-2 河床質採樣工作照片(一號孔)



圖6-3 河床質採樣工作照片（二號孔）

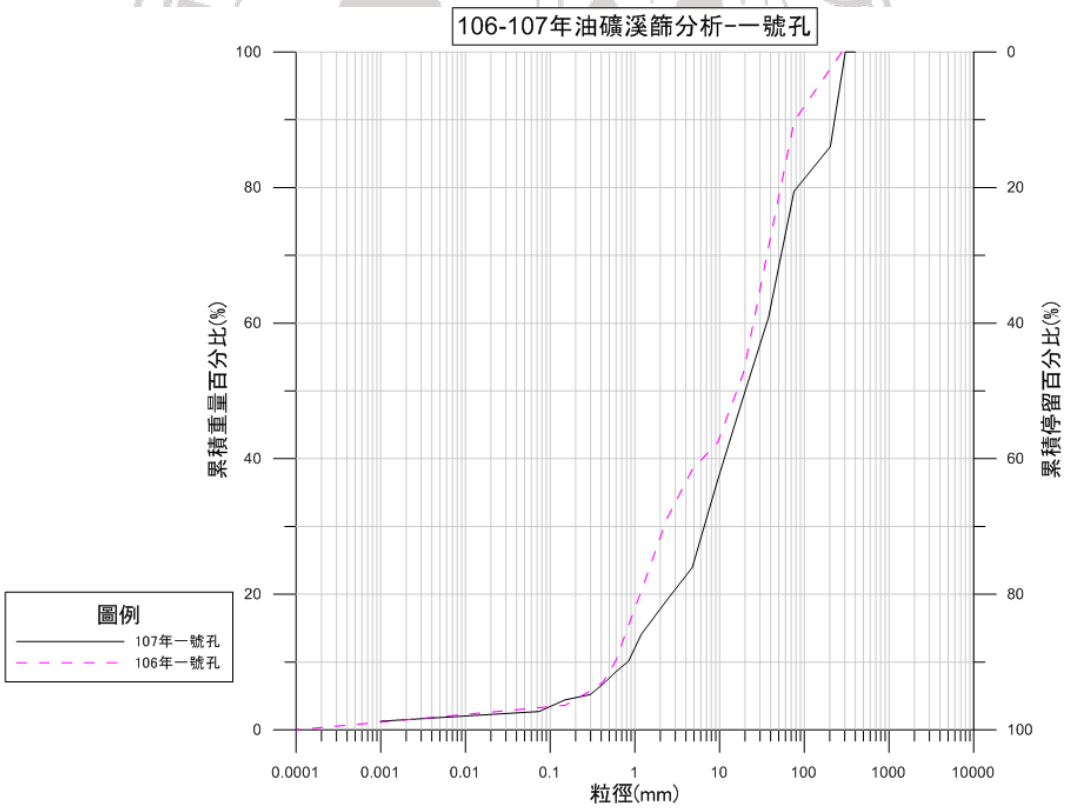


圖6-4 107 年河床值粒徑分析成果(107 年一號孔)

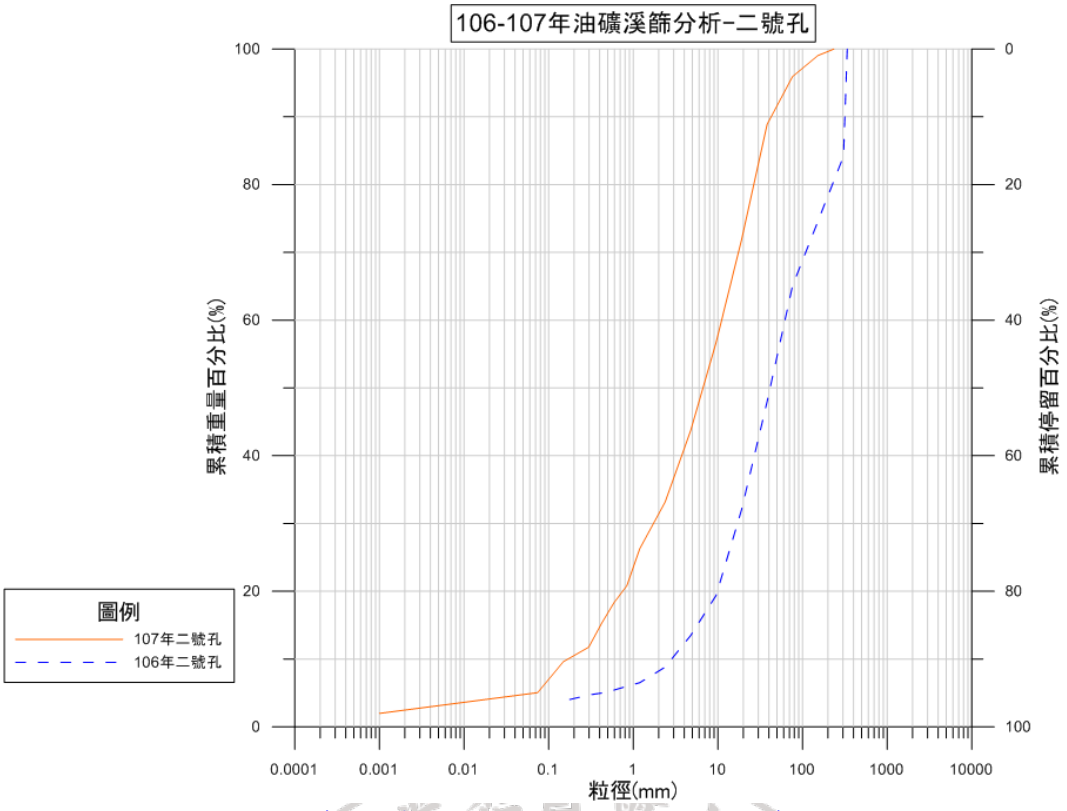


圖6-5 107 年河床值粒徑分析成果(107 年二號孔)

表6-2 河床值特徵粒徑比較表

| 106 年 | $D_{10}$ | $D_{30}$ | $D_{50}$ | $D_{60}$ | $D_{90}$ | 最大粒徑（mm） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 一號孔 | 0.6 | 2.2 | 17 | 25 | 75 | 278 |
| 二號孔 | 2.8 | 17 | 40 | 60 | 310 | 337 |
| 107 年 | $D_{10}$ | $D_{30}$ | $D_{50}$ | $D_{60}$ | $D_{90}$ | 最大粒徑（mm） |
| 一號孔 | 0.8 | 7 | 20.6 | 36.5 | 231.9 | 400 |
| 二號孔 | 0.2 | 1.8 | 7.1 | 11.6 | 44.1 | 235 |

由各代表粒徑比較，如表 6-2，於一號孔之粒徑去年度同一位置之河床質採樣資料，可知今年度大粒徑塊石所佔比例較大，因篩分析執行期間，河岸兩側仍可見去年度所進行清疏所堆置之塊石，延伸至上游崩坪坑處之河道，故可能受上游清疏工程影響所致。

於二號孔因清疏工程令原河段兩側為清疏所堆置土石，河床難以進行篩分析作業，今年度點位略往上游移動，但其結果仍受清疏導致上游河床粒徑出現細粒化之結果。

## 第二節　河道底床載量測現地試驗-USFS 採樣設備

今年度利用前述直接式採樣設備進行河床值採樣並與水聲計收錄資料進行比對，於 7 月 13 日進行 USFS 式採樣設備底床載輸砂量直接式取樣，現場表面流速約 0.8 m/s，底床流速紀錄約 0.7 m/s，水深約 10～18 cm，於現場水聲計安裝之固床工斷面設置 4 處採樣設備，如圖 6-6，實際設備運作情形如圖 6-7、圖 6-8，設備編號由面對下游面之右岸起算，其中編號 2 設備位置恰位於水聲計下游，所用囚砂網目為 0.5mm。

設置 USFS 囚砂網目的為採取低流量下底床載輸砂量，唯低流量時之底床載輸砂量較小，取樣時間前 2 次試驗設置為 2 小時，惟囚砂量結果仍相當少量，故第 3 次試驗延長為 3 小時，由現場取得之結果，第 1 次試驗第 1 組設備則編號為 1-1，其他編號則依此類推，囚砂採樣結果如表 6-2，由現場紀錄照片可知低流量下多為植生之樹枝、落葉，輸砂量相對較小，如現場照片圖 6-9，由紀錄表中可知設備 2（水聲計下游）囚砂量為最大，但相對洪水期間而言底床載輸砂量相當少量，後續於條件允許下將持續進行不同流況下試驗，並由此次經驗後續收錄時間延長至 4 小時或 1 日，由較長收錄時間取得較平均之結果。

表6-3　USFS 式採樣設備囚砂試驗紀錄表(107/07/13)

| 試驗時間 | 編號 | 囚砂重（g） |
|---|---|---|
| 2 小時（10:15~12:15） | 1-1 | 2 |
| | 1-2（水聲計下游） | 2.1 |
| | 1-3 | 0 |
| | 1-4 | 0 |
| 2 小時（12:20~14:20） | 2-1 | 0 |
| | 2-2（水聲計下游） | 102 |
| | 2-3 | 0.7 |
| | 2-4 | 0 |
| 3 小時（14:25~17:25） | 3-1 | 0 |
| | 3-2（水聲計下游） | 138 |
| | 3-3 | 0 |
| | 3-4 | 0 |




圖6-6 USFS 式採樣設備現場設置照片（107.7.13）



圖6-7 USFS 式採樣設備運作情形（面向下游）(107.7.13）



圖6-8 USFS 式採樣設備運作情形（面向上游）（107.7.13）



圖6-9 現場囚砂網收錄情形（107.7.13）

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

於 7 月 23 日進行 USFS 測試，此次測試時河道表面流速約 1.4 m/s，底床流速紀錄約 1.0 m/s，水深約 23～28 cm，於現場水聲計安裝之固床工斷面設置 3 處採樣設備（如圖 6-10），此次測試約 10 分鐘，河道中間之取樣器便已接近滿載，見表 6-4，期間水聲計撞擊次數見表 6-5，收集數據於後續進行撞擊次數與重量變化之關係整合。

USFS 採集土砂帶回室內進行篩分析，篩分析結果如圖 6-11，編號 1 河道右岸之採樣顆粒較小($D_{50}$=0.129 mm)，故難以與水聲計做比對，編號 2 水聲計下游捕獲土砂之中值粒徑 $D_{50}$=9.146 mm。

另左岸之取樣器因水流較強，而遭沖毀，故後續需再強化取樣器，及確認河流狀況進行試驗。




圖6-10 USFS 式採樣設備現場設置照片（107.7.13）

表6-4 USFS 式採樣設備囚砂試驗紀錄表(107/07/23)

| 試驗時間 | 編號 | 囚砂重（kg） |
|---|---|---|
| 10 分鐘<br>（10:15~10:25） | 1 | 0.422 |
| | 2（水聲計下游） | 14.734 |
| | 3（取樣器沖毀） | 0.004 |

表6-5 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣水聲計撞擊次數與囚砂重

| 放大倍率 | X1024 | X512 | X256 | X128 | X64 | X32 | X16 | 囚砂重 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 撞擊次數 | 2827 | 1487 | 554 | 168 | 46 | 4 | 1 | 14.734 |

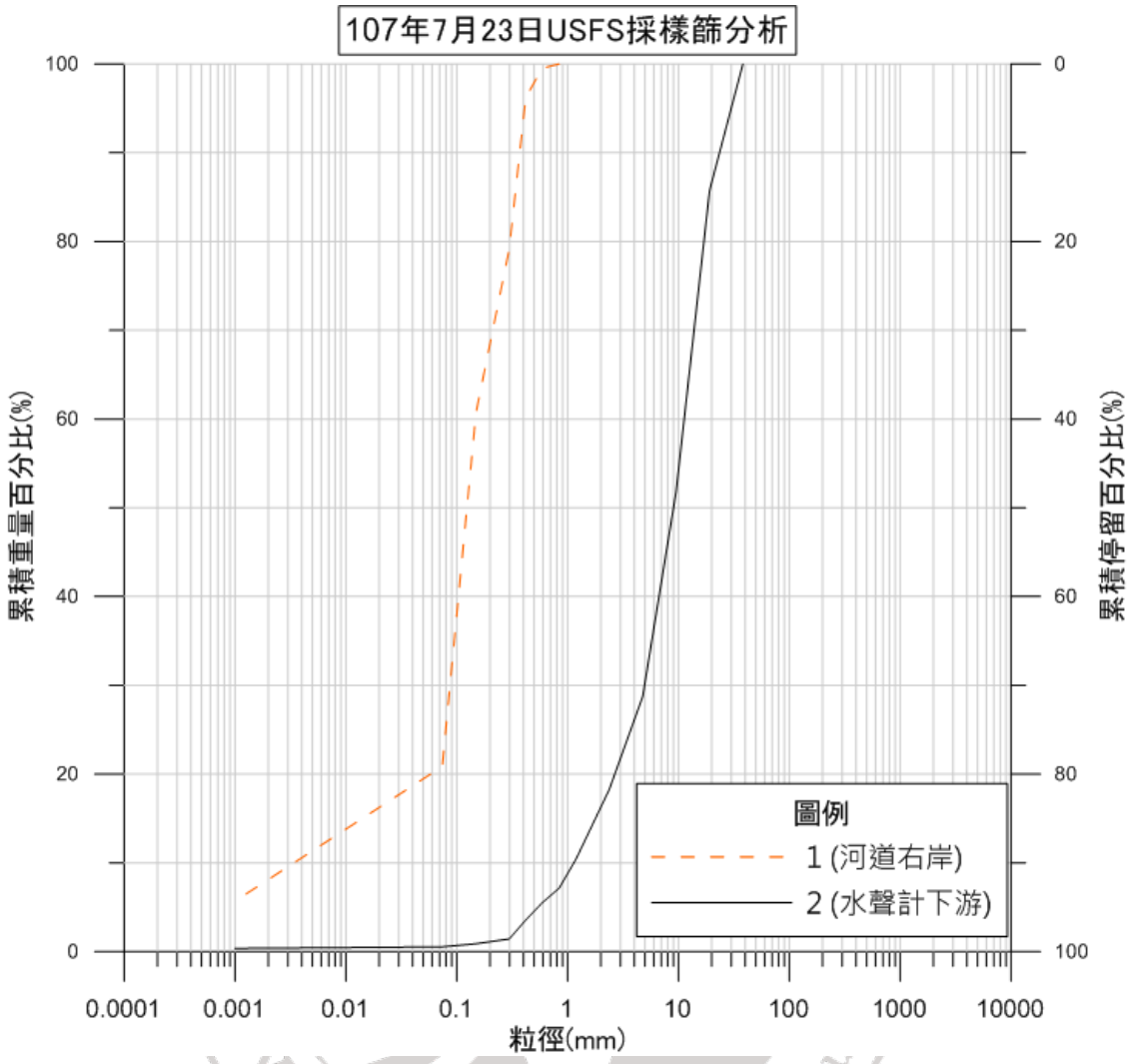


圖6-11 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣篩分析

於 9 月 27 日進行 USFS 測試，此次測試時河道表面流速約 1.0 m/s，水深約 15～20 cm，於水聲計下遊以及河道右岸各設置一 USFS 採樣設備(如圖 6-12)，此次收集時間共 5 小時，但因流速較低，並未能收集有效顆粒(如圖 6-13)，且水聲計亦無顯著撞擊，後續再確認現場流速找尋適當機會進行採樣試驗。

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)




圖6-12 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣設備設置




圖6-13 107 年 7 月 23 日 USFS 採樣設備收集結果

Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 第三節　河道底床載量測現地試驗-水聲計配合囚砂箱試驗

## 一、試驗規劃

於現地土砂監測示範站以人工方式供砂，進行不同供砂率條件之試驗，並於下游端架設捕砂設備，驗證水聲計量測成果，今年度已更換為厚度 7.5 釐米後之金屬管，除完成其撞擊次數與底床載輸砂量關係外，並與前期厚度 3 釐米之金屬管之成果比較。

利用前述分析成果以及現地流量，試驗使用現地土砂，於現地架設擋水設施（砂包、擋板等），使其形成一長方形渠道，並採取現地單一粒徑土砂，於示範站上游以人工供砂進行不同供砂率條件之試驗，並利用下游端囚砂箱收集經過水聲計之土砂，將水聲計所量測總撞擊次數，與囚砂箱收集之土砂進行統計回歸，驗證水聲計量測成果，試驗步驟如下，實驗流程圖見圖 6-14。

(一)、　於水聲計設備上游架設擋水設施，使其形成一長方形渠道。

(二)、　架設囚砂設備，將其置放於水聲計下游，於上游開始供砂後，攔阻通過水聲計之土砂。

(三)、　待水流流況穩定後，於上游以人工供砂，使土砂向下運移撞擊水聲計。

(四)、　上游供砂停止後，觀察紀錄一段時間後，擷取水聲計紀錄資料，將囚砂設備取出量測其土砂總重量。

(五)、　改變土砂粒徑或供砂量，重新依上述步驟依序進行。

(六)、　分析水聲計撞擊次數與囚砂箱所收集土砂總重量之關係。

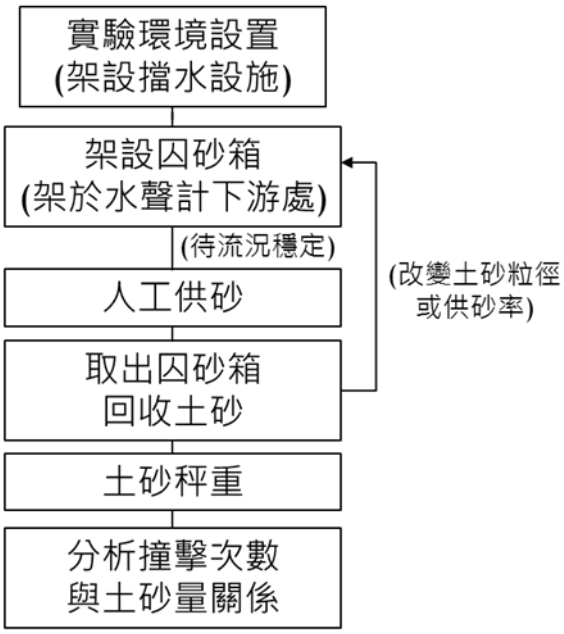


圖6-14 現地實驗流程圖

透過下游處的捕砂設備收集通過水聲計之土砂，於現地實驗後進行秤重，並估算單位寬度之土砂運移量，與水聲計所量測到之撞擊次數相互比對後，為建立水聲計所量測之泥砂顆粒撞擊次數與流量及底床載輸砂量之率定關係，如下圖 6-15、圖 6-16 所示，進而將水聲計所量測之不同放大倍率之顆粒撞擊次數，轉換為**底床載輸砂量**，此方法須經過較長期資料蒐集，以找出適宜之放大倍率，所蒐集數據可應用於鄰近相似流域測站。

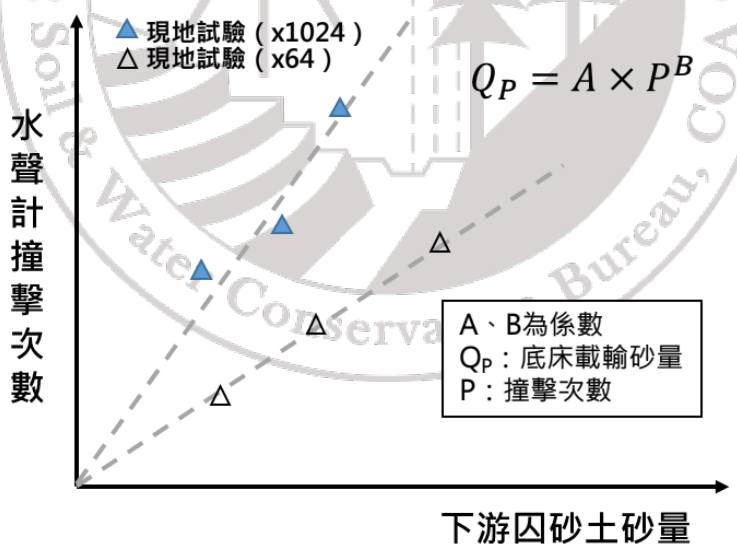


圖6-15 撞擊次數與輸砂量關係示意圖

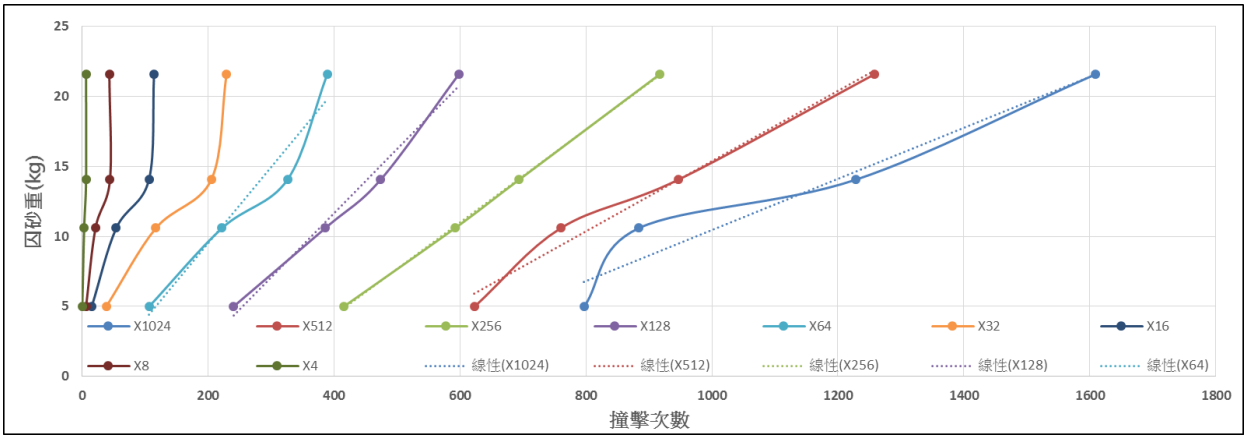


圖6-16 撞擊次數與囚砂重關係圖（前期成果）

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

二、試驗設置

人工供砂直接使用現地土砂進行試驗，試驗土砂以混合粒徑進行試驗，後續透過現地囚砂箱捕獲土砂進行粒徑分析，供砂量以每分鐘 20 kg 進行試驗。

於現地河道利用河道土砂進行堆積土堤圍水，透過調整土堤進行水道束縮，試驗中土堤上游端設置筆直渠道，並上游渠道寬度設置為 3 公尺寬，長度為 30 公尺長，如圖 6-17，接近水聲計的下游端，藉由束縮渠道至約 1.3 公尺寬，如圖 6-18，以獲得較大之流速，試驗設置完成後表面流速約 1.4 m/s，於水聲計上游 3 公尺處進行人工供砂，如圖 6-19，試驗中捕砂方式使用今年度設置之囚砂箱，於下游囚砂箱進行捕砂，並配合箱內秤重系統進行連續重量變化紀錄，試驗過程中捕獲之土砂於現地進行篩分析及將細粒料帶回室內進行秤重與粒徑分析。



圖6-17 現地試驗渠道設置（107/11/3）



圖6-18 渠道下游 1.3 公尺寬（107/11/3）




圖6-19 於水聲計上游 3 公尺處供砂（107/11/3）

## 三、試驗成果

試驗過程中持續進行供砂，供砂時間持續 60 分鐘，觀測時間同樣為 60 分鐘，箱內累積土砂重量透過囚砂箱內秤重系統紀錄，於箱內滿水位時重量約 520 公斤，箱內無水時重量約 820 公斤，水中浮力影響約為 300 公斤，箱內土砂堆積狀況如圖 6-20，箱內土砂篩分析結果如圖 6-21 所示，撞擊次數對重量變化紀錄如圖 6-22，因箱內秤重系統紀錄方式採每秒感測值進行單分鐘的平均值計算，且秤重系統其量測感度為 5 公斤，為避免單分鐘內入砂量不足 5 公斤影響測重，將重量量測結果以 5 分鐘平均方式進行呈現，撞擊次數亦採 5 分鐘內累積次數呈現。



圖6-20 現地試驗後箱內土砂堆積狀況

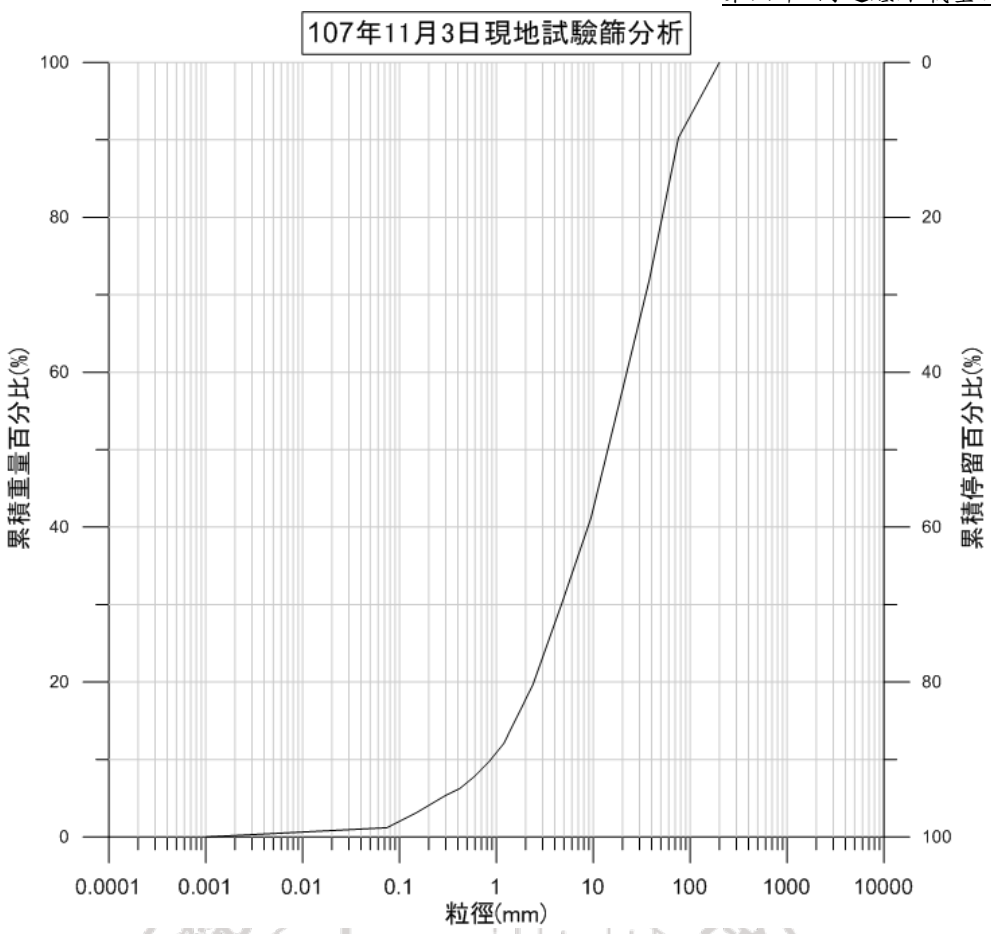


圖6-21 107/11/03 現地試驗篩分析成果

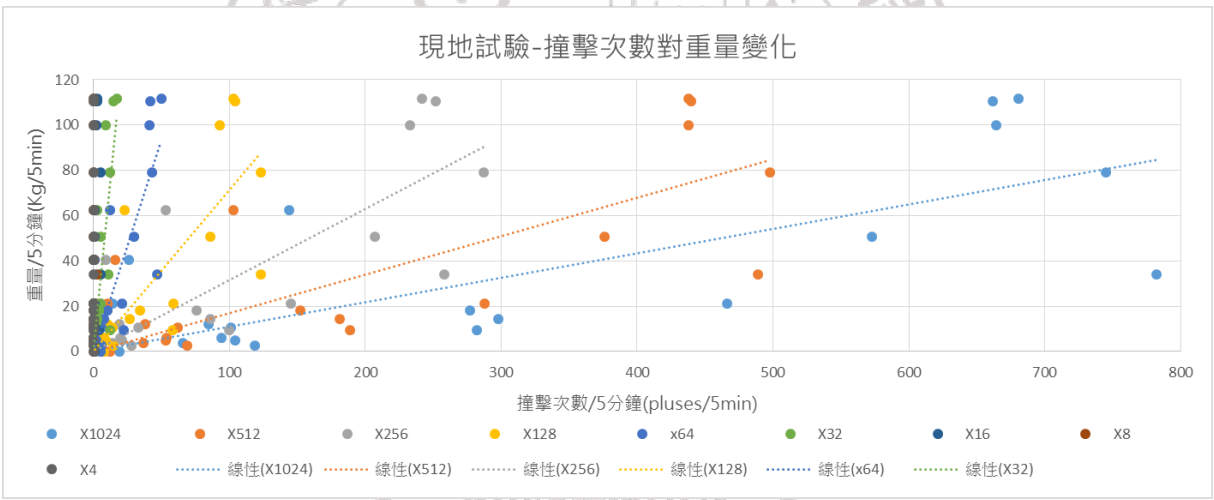


圖6-22 現地試驗每 5 分鐘水聲計撞擊次數對每 5 分鐘重量變化紀錄

依據現地試驗結果(如圖 6-22)，透過線性趨勢線並將截距設定為 0 值，得出各放大倍率之趨勢線公式以及決定係數($R^2$)，如表 6-6，選取較大決定係數之放大倍率，作為輸砂量推估之依據，此次試驗中因 4 倍、8 倍撞擊反應較少，於 4 倍甚至為零，故不列入表中評估，由決定係數($R^2$)選定使用 **64 倍放**

**大倍率**之撞擊次數作為水聲計之輸砂量推估依據。

表6-6　各放大倍率之趨勢線公式以及決定係數

| 放大倍率 | 趨勢線公式 | 決定係數($R^2$) |
|---|---|---|
| X1024 | y = 0.1084x | 0.5361 |
| X512 | y = 0.1696x | 0.5686 |
| X256 | y = 0.314x | 0.5969 |
| X128 | y = 0.7115x | 0.5247 |
| X64 | y = 1.856x | 0.6322 |
| X32 | y =6.0119x | 0.5369 |
| X16 | y = 17.275x | 0.0885 |

分析過程嘗試納入 USFS 測試結果，雖只有一筆數據，但與此次試驗結果差異頗巨，使整體決定係數($R^2$)降低，故未列入此試驗成果；另與前期人工接砂結果相比較(見圖 6-23)，雖因前期採單分鐘內量測接砂，而非持續接砂，無法直接納入試驗成果，但試驗撞擊次數與承接重量之規模，與前期相比已有較大幅度的增加，資料散布範圍亦較廣，更具有代表性。

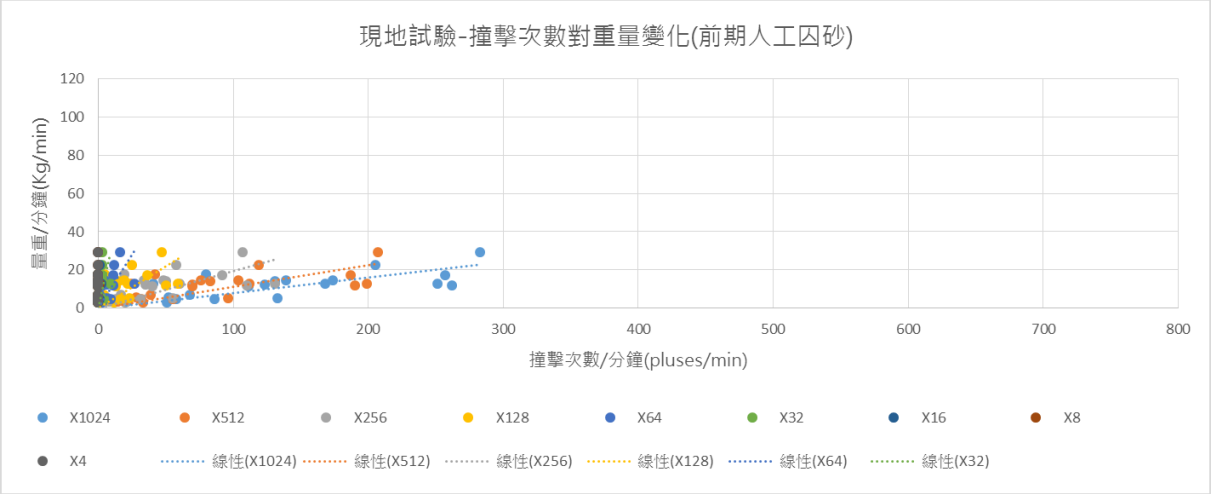


圖6-23 現地試驗水聲計撞擊次數對重量變化紀錄(前期人工囚砂)

四、試驗檢討

今年度現地試驗中使用 USFS 採樣設備以及水聲計配合囚砂箱試驗等兩種方式，前者主要透過人員設置，故需於較低流量進行設置，未求測得可用數據，需挑選降雨後之時間點，方可得適合流況進行採樣。

水聲計配合囚砂箱試驗，則需透過機具圍水調整河道寬度進行試驗，但試驗流量亦受河道水量影響，並考慮試驗人員之安全性，亦需挑選適當時機

進行相關試驗方能得到理想流況進行試驗，另為配合囚砂箱收集亦需考慮下游水位之影響，水位過高則難以取出箱內土砂進行分析，相關遭遇問題與改善方法如表 6-7 所列。

表6-7　現地試驗遭遇問題與改善方法

| 現地試驗方式 | 遭遇問題 | 改善方法 |
|---|---|---|
| USFS 採樣設備 | 河川水流流況無法推動土砂顆粒 | 挑選適當流況，水深約 20cm，流速約 1.2m/s |
| | 水流造成採樣設備損壞 | 改變採樣設備製作材料，改採鋼製焊接製作 |
| 水聲計配合囚砂箱試驗 | 河川水流流況無法推動土砂顆粒 | 挑選適當流況，並調整圍水土堤之寬度 |
| | 下游水位影響取出囚砂箱體之收集土砂 | 利用抽水機以及上游導水，暫時阻斷水流，來取出砂箱內土砂 |

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 第七章　水聲計室內水槽試驗

室內試驗目的與現地試驗相同，為驗證水聲計量測成果，所控制條件為，渠道坡度、渠道流量、土砂材料、土砂粒徑以及供砂速率等，試驗主要可分水聲計單一顆粒敲擊試驗以及水槽試驗，以下進行實驗相關介紹與說明。

## 第一節　實驗設備介紹

實驗所使用設備相關介紹如下：

一、管式水聲計：

室內實驗所使用的管式水聲計與現地安裝之管式水聲計，承受撞擊的金屬管長度 100 cm，內徑為 42.6 mm，管壁厚度分別為 3、7.5 mm，可針對不同厚度金屬管進行實驗，所使用的訊號轉換器型號為 HT-HP5，亦與現地同規格，設備詳見下圖 7-1。

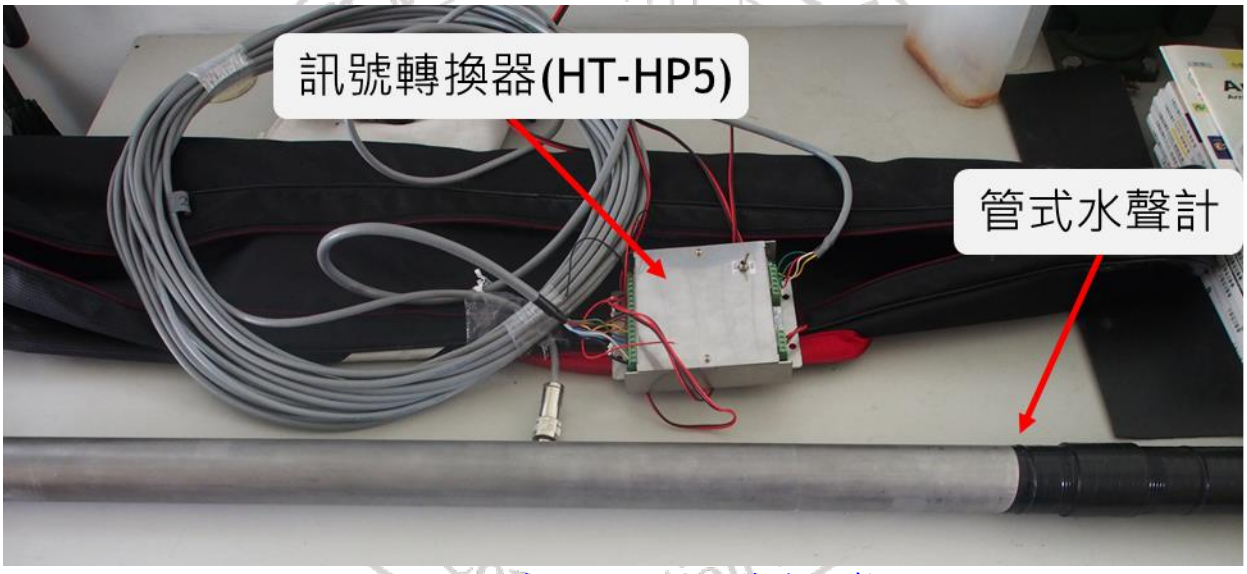


圖7-1 室內實驗所使用之管式水聲計

二、訊號擷取卡：

室內實驗中利用訊號擷取卡，將訊號轉換器之訊號轉存於電腦中，透過此步驟，取代現地資料紀錄器之功能，所使用的訊號擷取卡為 ADVANTECH 所生產的 USB-4716，共有 16 通道可供使用，取樣頻率最大可達每秒 200K，詳見下圖 7-2。




圖7-2 訊號擷取卡 USB-4716

三、單一顆粒敲擊試驗用實驗架：

單一顆粒敲擊試驗中，需要兩種實驗架，第一種為 45 度斜坡實驗架，提供單一顆粒沿斜坡滾動落下，撞擊管式水聲計，第二種為垂直落下平面實驗架，提供單一顆粒由一平面中，垂直自由落下，撞擊管式水聲計，如下圖 7-3 所示。

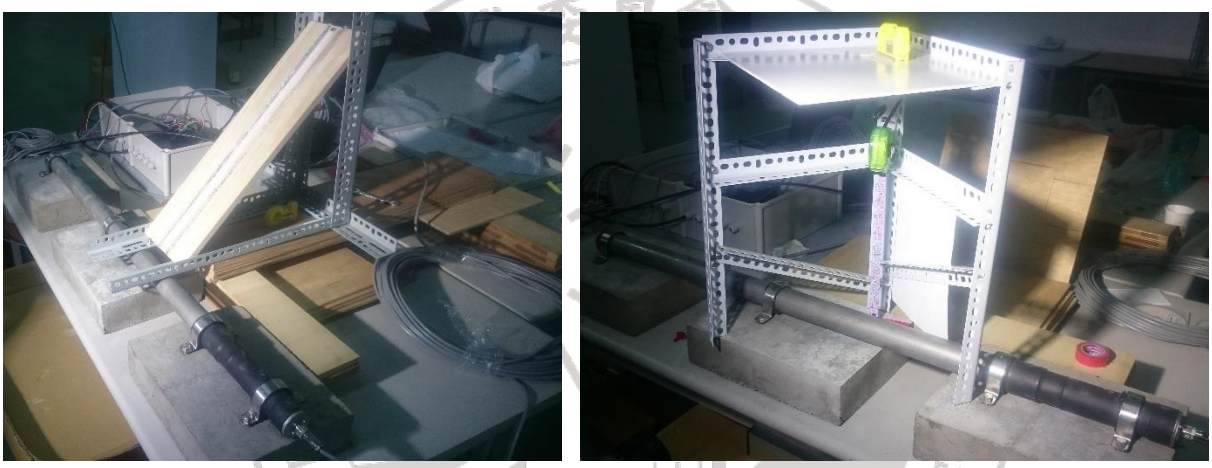

圖7-3 單一顆粒撞擊試驗實驗架：45 度斜坡及垂直落下平面示意圖

四、實驗水槽：

室內實驗所用實驗水槽設置於成功大學水工試驗所內，為本團隊自有設施，水槽尺寸如下：長 1000 cm、寬 40 cm、槽高 50 cm，水槽兩側為 1 cm 厚的平光玻璃，方便試驗中觀察與紀錄，水槽底面鋪設鋁板，表面光滑無粗糙度，詳見圖 7-4，水槽另有坡度調整裝置，以及流量控制閥門，詳見圖 7-5，分別控制水槽坡度與水槽流量，坡度最大可達 10 度，流量最大可達 9800 立方公分/秒（$cm^3/s$）。



圖7-4 室內實驗水槽




圖7-5 坡度調整裝置與流量控制閥門

五、供水系統：

水槽的水源供給來源為水槽尾端的蓄水池，先行儲水，之後透過管線與抽水馬達，將水抽至高處的定水頭水箱，如圖 7-6，再經由管線連接至水槽前端，藉此提供水槽穩定水流。



圖7-6 定水頭水箱

六、量測設備：

(一)　水位針尺：用來量測試驗過程中水槽內的水位高低，使用型號為東京計測株式会社所生產的 ME-1，具有歸零校正功能，如圖 7-7。

(二)　流速計：用來量測試驗過程中水槽內的流速，使用型號為 JDC 所生產的 Flowatch，如圖 7-8。

(三)　囚砂箱：用來量測通過管式水聲計的土砂量，放置於水槽尾端進行囚砂並濾除水體。

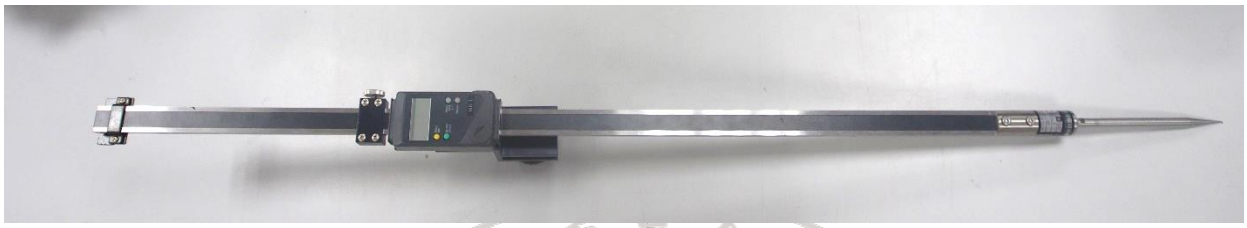

圖7-7 水位針尺(ME-1)




圖7-8 流速計(Flowatch)

七、攝影設備：

利用攝影設備紀錄實驗中相關過程，並利用此實驗記錄用於後續分析與檢討，所使用的設備為 OLYMPUS 所生產的 OM-D EM-5，影像畫素 4000 萬，影像拍攝頻率可達 60fps，如圖 7-9。




圖7-9 攝影設備(OM-D EM-5)

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

## 第二節　河道底床載量測室內試驗說明及規劃

室內試驗首先說明水聲計所使用之底床載輸砂量推估方法，以及後續實驗規劃，室內試驗主要取得不同管厚水聲計於相同水流、粒徑條件下之差異，比對厚薄管差異，並利用不同單一粒徑進行之比對（偵測率等），並比較不同推估方法與實際輸砂量之差異。

一、底床載輸砂量推估方法說明

本年度計畫採用三種不同之推估方法，如表 7-1 所示，（一）**特定倍率撞擊次數推估輸砂量**、（二）**不同倍率撞擊次數推估輸砂量**、（三）**音壓動量關係推估輸砂量**。

（一）特定撞擊次數推估輸砂量方法為找到集水區土砂特性（流速、粒徑大小等）其所對應之特定放大倍率撞擊次數，特定放大倍率撞擊次數與底床載輸砂量間呈現相同趨勢，以此推估底床載輸砂量

（二）不同倍率撞擊次數推估輸砂量方法為不同放大倍率之撞擊次數其所代表即為不同粒徑大小之土砂撞擊，利用不同倍率區分粒徑，再將粒徑乘上撞擊次數即為底床載輸砂量

（三）音壓動量關係推估輸砂量方法系利用單次撞擊產生之最大音壓與動量呈現線性關係，利用所得到最大音壓值即可得到單次撞擊動量，代入顆粒流速即可求得顆粒重量，即可求得底床載輸砂量，各方法之詳細說明如下

表7-1　水聲計底床載推估方法簡表

| 編號 | 推估方法 | 概述 |
|---|---|---|
| （一） | **特定倍率撞擊次數推估輸砂量** | 利用選定特定倍率撞擊次數與底床載輸砂量統計回歸關係曲線推估 |
| （二） | **不同倍率撞擊次數推估輸砂量** | 利用不同放大倍率撞擊次數之門檻值區分粒徑大小推估 |
| （三） | **音壓動量關係推估輸砂量** | 利用各次撞擊產生最大音壓值，由音壓動量關係推估 |

(一) 特定倍率撞擊次數推估輸砂量

利用與現地相近之粒徑分佈土砂顆粒進行試驗，找出其合適音訊放大倍率，所收集到的撞擊次數與土砂重量呈現線性關係，代表此倍率能良好的反應土砂數量多寡，以作為分析時挑選放大倍率之參考。

所選出特定倍率撞擊次數，以放大倍率 16 倍為例，如下圖 7-10，由撞擊次數與底床載輸砂量關係可得到以下之撞擊次數與底床輸砂量關係式，即可藉由特定撞擊次數推估底床載輸砂量。

$$q_b = \mathrm{A} \times P_{16}$$

$q_b$為底床載輸砂量、A 為係數、P 為特定放大倍率之撞擊次數

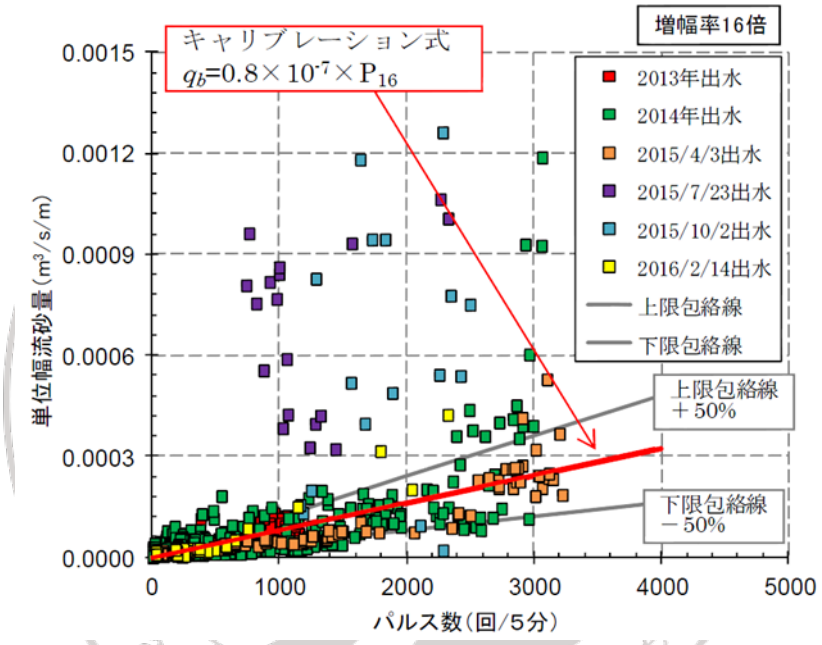


圖7-10 日本撞擊次數與輸砂量關係示意圖(日本工営株式會社，2016)

(二) 不同倍率撞擊次數推估輸砂量

水聲計所紀錄音壓訊號透過不同放大倍率進行放大，由下圖 7-11 可知放大較大之撞擊次數可包含較小顆粒之撞擊所產生之較小音壓訊號，不同放大倍率具有最小粒徑之門檻值，如表 7-2 所示，意即不同放大倍率間撞擊次數差值，即為不同粒徑之撞擊次數，假設顆粒為圓球狀，利用粒徑推估其重量，單位時間內不同放大倍率撞擊次數差值，乘上重量即為底床載輸砂量，如下式所示。

$$q_b = \Sigma P_x \times D_x^3 * \times \pi/6 \times (\sigma - \rho)$$

$P_x$為不同放大倍率間差值、$D_x$ 不同放大倍率所代表最小粒徑平均值、$\sigma$為土砂顆粒密度、$\rho$為水密度、x 代表不同放大倍率（例：8-4 為放大倍率 8 倍與 4 倍間撞擊次數差值如下圖即為 1，粒徑平均值為 1.343 cm）

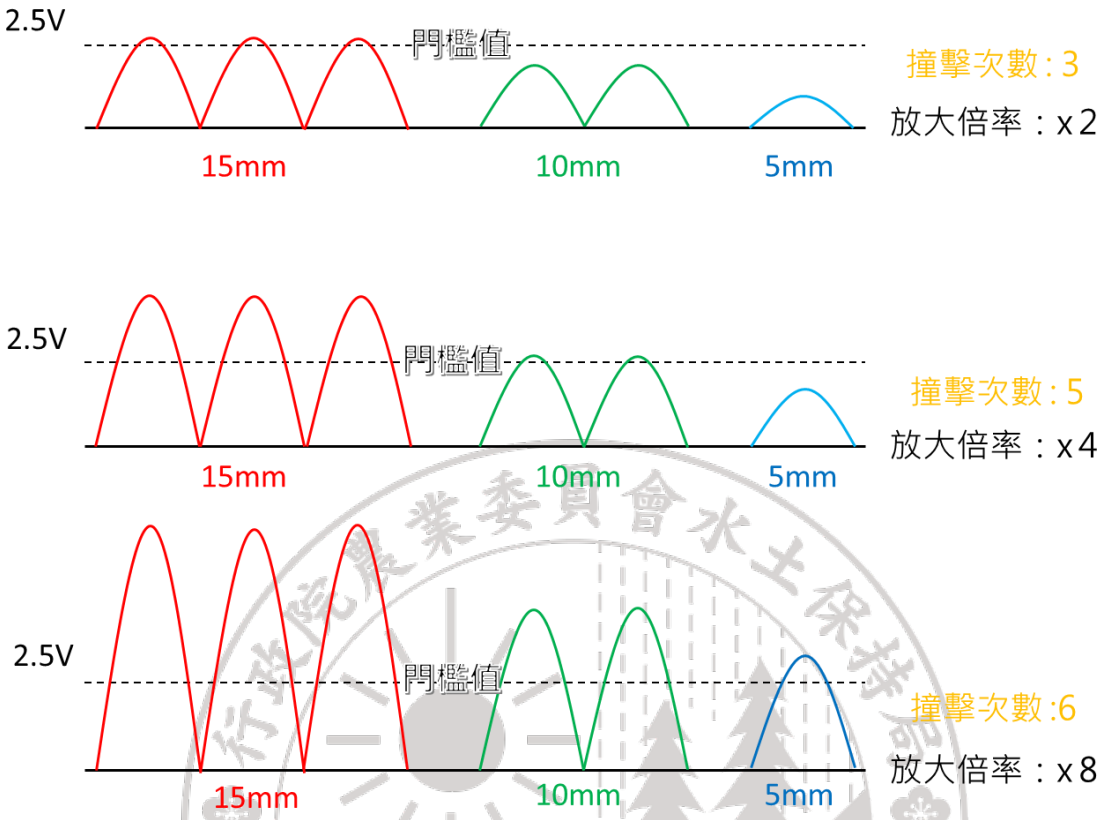


圖7-11 不同放大倍率下撞擊次數計算示意圖

表7-2 流速 1.9m/s 條件下不同放大倍率粒徑門檻值

| 放大倍率 | 最小觸發門檻值 (mVolt) | 最小觸發粒徑 D(cm) | 重量 m(g) |
|---|---|---|---|
| 1024 | 2.4 | 0.194 | 0.0088 |
| 512 | 4.9 | 0.250 | 0.0191 |
| 256 | 9.8 | 0.324 | 0.0413 |
| 128 | 19.5 | 0.419 | 0.0892 |
| 64 | 39.1 | 0.542 | 0.1929 |
| 32 | 78.1 | 0.700 | 0.4172 |
| 16 | 156.3 | 0.906 | 0.9022 |
| 8 | 312.5 | 1.171 | 1.9508 |
| 4 | 625.0 | 1.514 | 4.2183 |
| 2 | 1250 | 1.958 | 9.1214 |

(三) 音壓動量關係推估輸砂量

室內實驗除收集撞擊次數外，另可收集音壓訊號(Sound Pressure)進行推估分析，其流程如下圖 7-12，水聲計受顆粒撞擊後之音壓波形紀錄，其峰值即為乙次撞擊造成最大音壓值，利用室內試驗建立音壓與動量間之關係式，如圖 7-13，由水聲計所量測之最大音壓值推估顆粒撞擊之動量（mv），土砂顆粒速度可利用底床流速計量測或以底床載輸砂公式估算（如式 7-1～式 7-6 說明），即可估算土砂顆粒質量，並假定撞擊顆粒為圓球體，進行撞擊顆粒其粒徑的計算，如圖 7-14 所示。

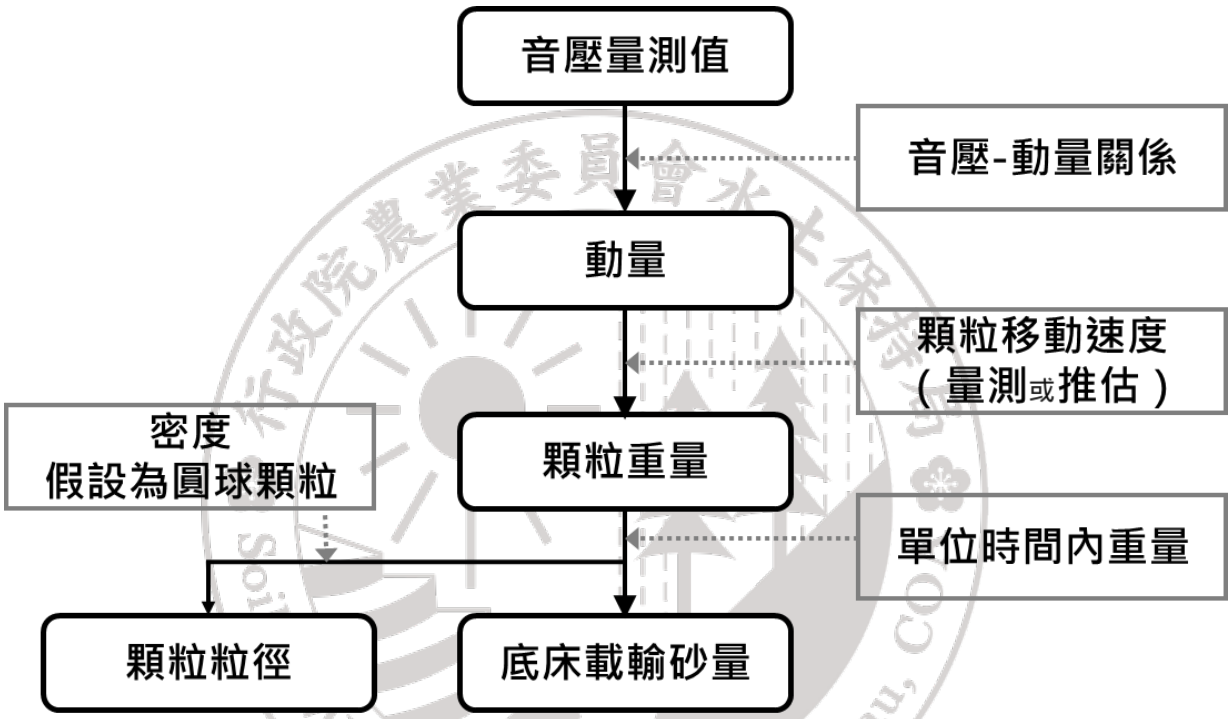


圖7-12 音壓與動量推估輸砂量流程圖

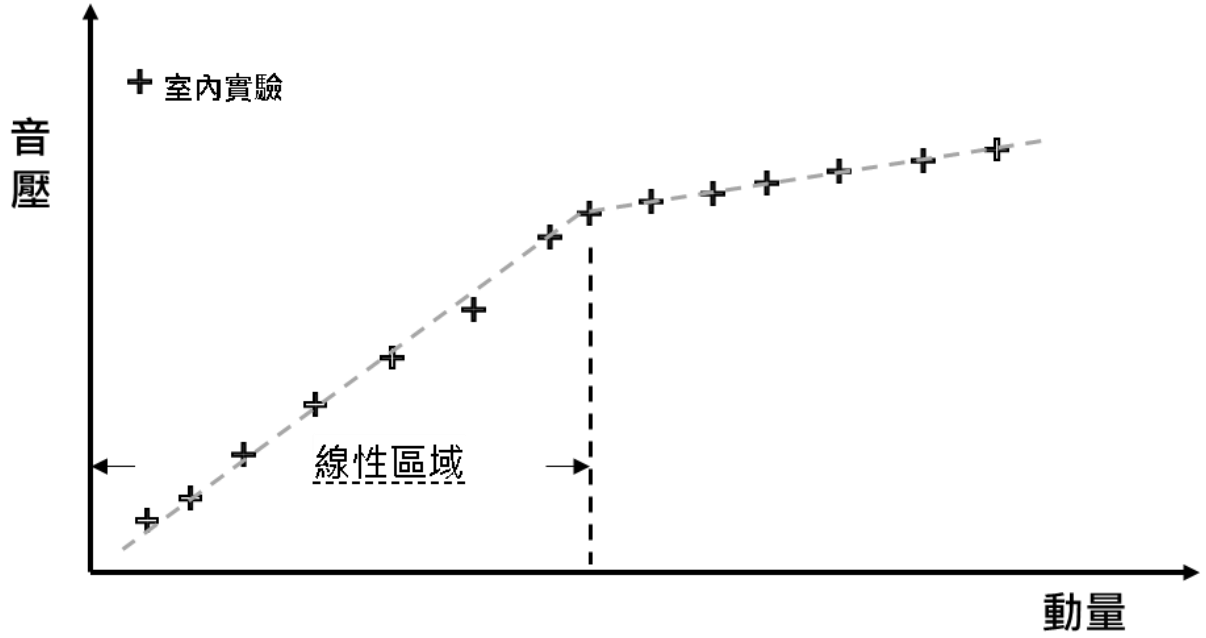


圖7-13 音壓與動量關係示意圖

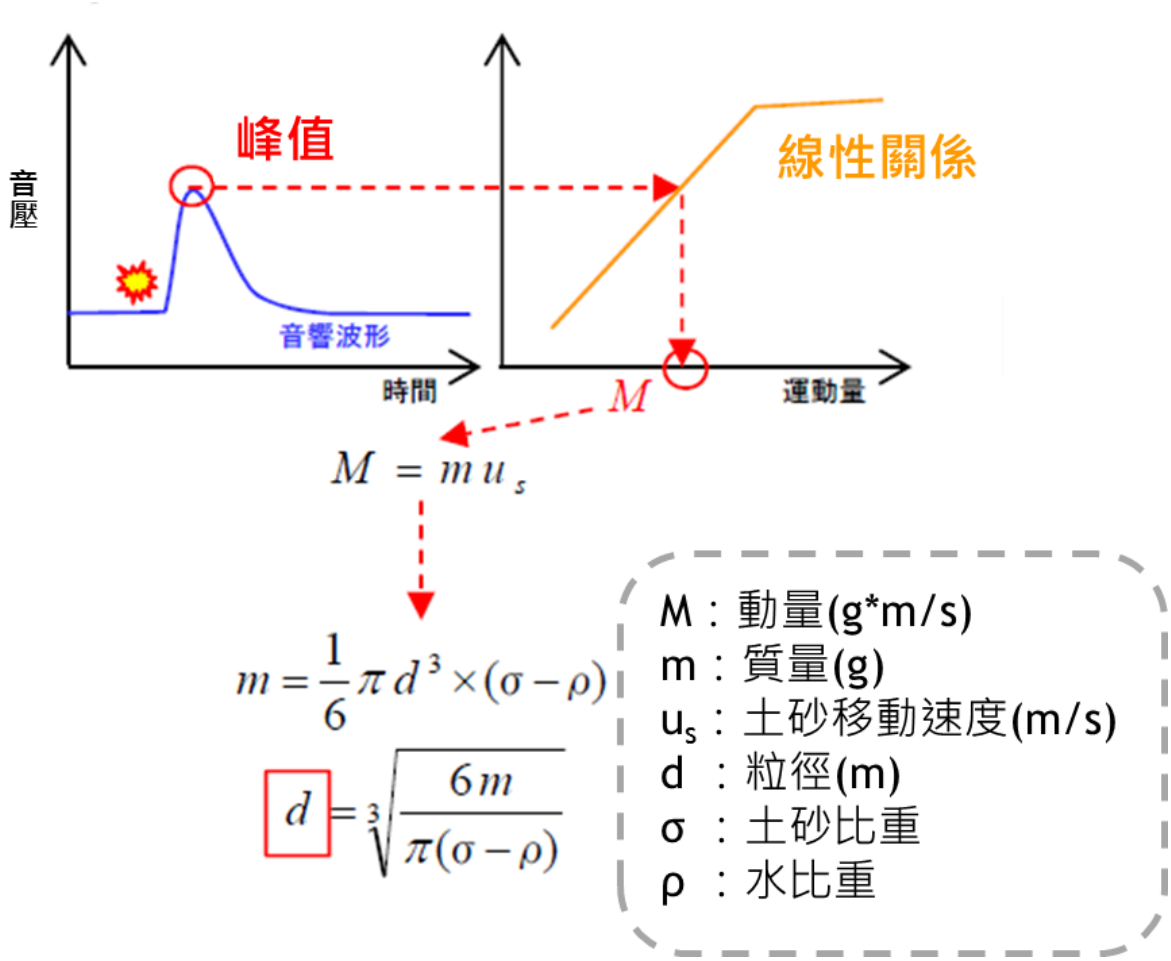


圖7-14 土砂粒徑推估示意圖(日本工営株式會社，2016)

底床載輸砂公式：

$$q_b \cong \overline{c_s} \times \overline{u} \times h_s$$ ..... 式 7-1

$q_b$:單寬底床載輸砂量，$c_s$：底床載土砂濃度，$h_s$:底床載移動層厚度

目前常用於推估土砂體積、土砂顆粒移動速度之公式為芦田•道上式以及 EMI 式，分別敘述如下：

**芦田•道上式（日本，土木学會論文報告集，206 號，1972）**

$$\frac{q_b}{\sqrt{(\sigma/\rho-1)gd^3}} = \frac{\beta}{\mu_f}\tau_{*e}^{\frac{3}{2}}\left(1-\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)\left(1-\sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right)$$ ..... 式 7-2

輸砂量體積

$$\frac{c_s h_s}{d} = \frac{1}{\mu_f}(\tau_* - \tau_{*c})$$ ..... 式 7-3

土砂顆粒速度

$$\frac{u_s}{u_*} = \beta\left(1-\frac{u_{*c}}{u_*}\right)$$ ..... 式 7-4

$q_b$:單寬輸砂量，$\beta$：土砂流速係數，$\mu_f$:土砂動摩擦係數，$\tau_{*e}$：有效剪應力，$\tau_*$：無因次剪應力，$\tau_{*c}$：無因次臨界剪應力，$u_*$：摩擦速度，$u_{*c}$：臨界摩擦速度，d：粒徑

**EMI 式（日本，江頭進治，水理公式集，1999）**

輸砂量體積

$$\frac{\overline{c_s} h_s}{d} = \frac{1}{cos\theta}\frac{1}{tan\emptyset_s - tan\theta}\tau_*$$ ..... 式 7-5

土砂顆粒速度

$$\frac{\overline{u}}{u_*} = \frac{4}{15}\frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}}\tau_*$$ ..... 式 7-6

$\overline{u} = \sqrt{ghsin\theta}$、$\tau_* = u_*^2/((\frac{\sigma}{\rho}-1)gd)$、$K_1 = \frac{1}{cos\theta}\frac{1}{tan\emptyset_s - tan\theta}$、

$K_2 = \frac{1}{\overline{c_s}}[1-\frac{h_s}{h}]^{1/2}$

$f_d = \mathrm{k}_d(1-e^2)(\sigma/\rho)\overline{c_s}^{-1/3}$　　$f_f = k_f(1-\overline{c_s})^{5/3}\overline{c_s}^{-2/3}$

單一音壓與動量推估出單次撞擊土砂之重量，將單位時間間加總即為底床載輸砂量，並可藉由此密度及圓球體假設粒徑分布推估，如圖 7-15 所示，於單位時間內所觀察到的音壓值，進行個別粒徑推算，整理後便可得出單位時間內的粒徑分布曲線圖。

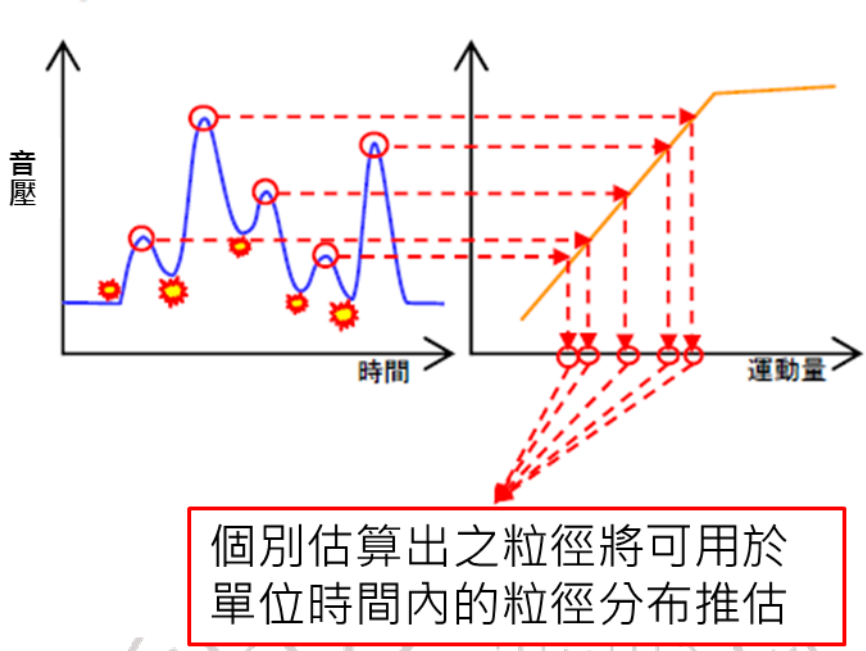


圖7-15 粒徑分布推估示意圖(日本工営株式會社，2016)

二、室內水聲計試驗規劃

(一) 音壓與動量關係試驗

去年度現地 3mm 管厚水聲計因受塊石撞擊損壞，故更換為較堅固，可承受土砂顆粒較大之 7.5mm 管厚水聲計，於室內針對兩種不同管厚水聲計建立音壓動量曲線，並比較其差異性。

利用單一顆粒敲擊為管式水聲計，以及了解不同管厚於同樣條件下土砂顆粒撞擊所產生之差異，以下進行試驗步驟說明：

音壓動量關係曲線：

分為架設一 45 度斜坡，以及垂直自由落下撞擊水聲計兩種，實驗流程如圖 7-16 所示：

1. 架設一 45 度斜坡／垂直落下平面，令其平面延長線通過水聲計之鋼管圓心，確保其撞擊位置相同。
2. 在固定高度上，令不同材質、形狀的土砂單一顆粒，沿斜坡面滑落／垂直落下平面落下，撞擊水聲計，如圖 7-17 所示。
3. 改變不同釋放高度，使撞擊顆粒擁有不同動量。
4. 分別利用不同材質、形狀、粒徑大小的土砂單一顆粒及鋼球，撞擊水聲計，依上述步驟重複進行。
5. 根據水聲計量測結果，與撞擊速度分析結果，進行分析音壓與動量。

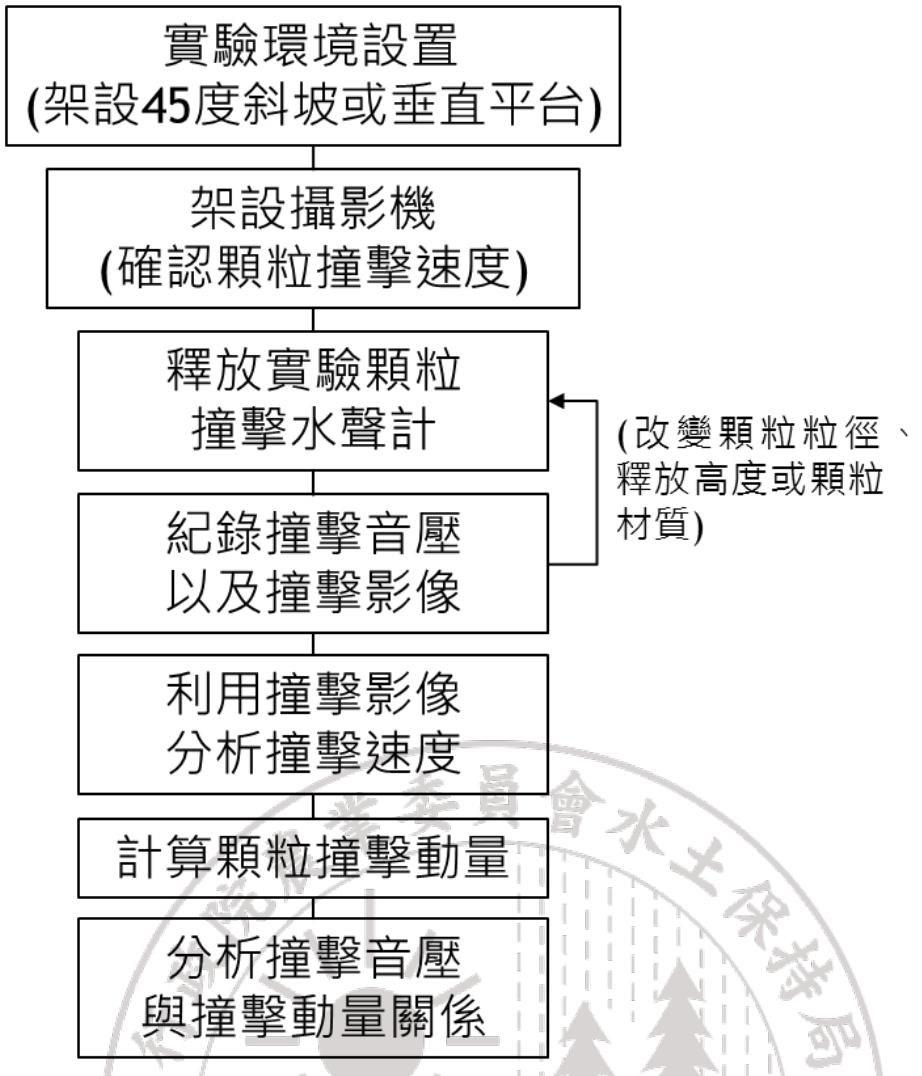


圖7-16 單一顆粒敲擊試驗流程圖

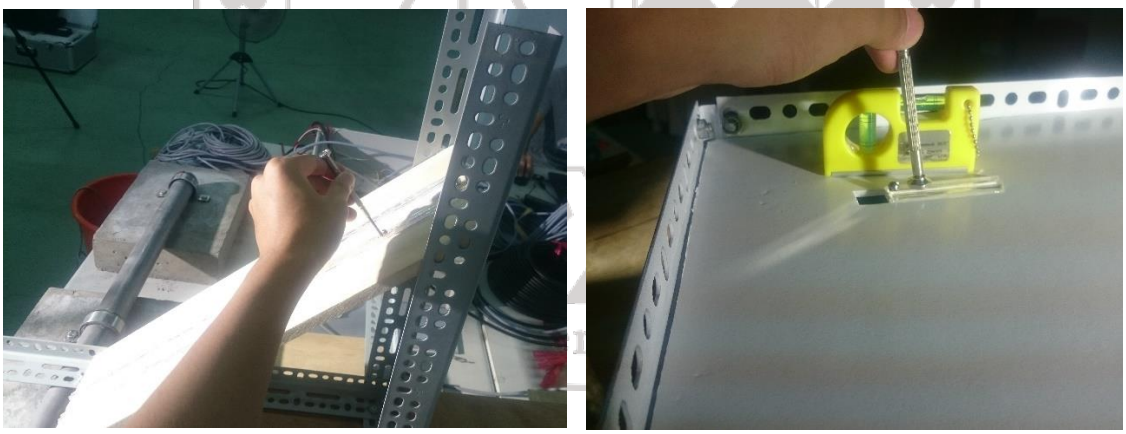

圖7-17 單一顆粒撞擊試驗：45 度斜坡及垂直落下示意圖

以管式水聲計之率定，係透過單一顆粒撞擊試驗，建立音壓與動量的關係，如圖 7-18，透過此關係可進行後續的土砂顆粒粒徑分析。

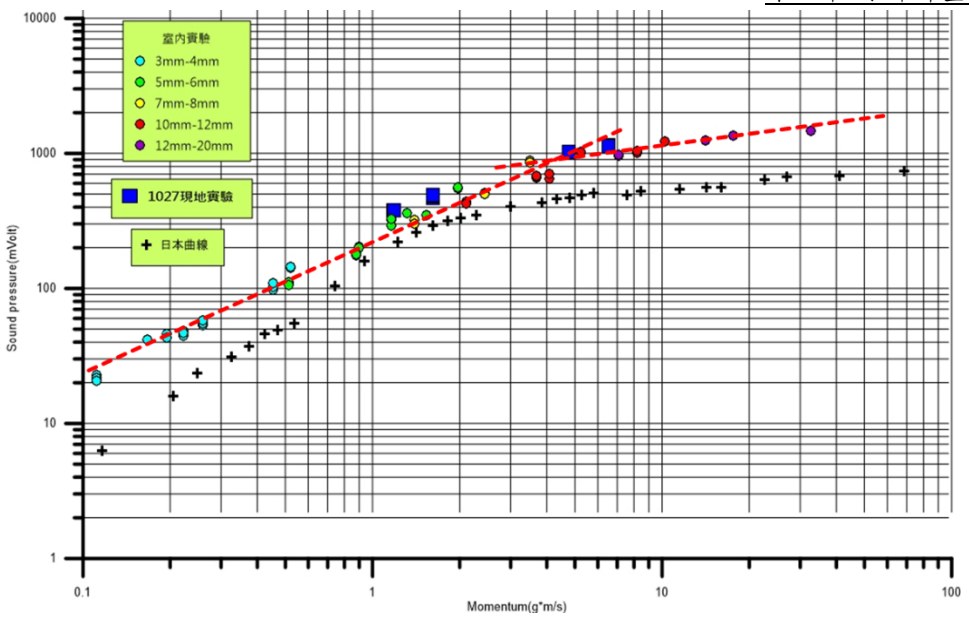


圖7-18 3mm 管厚水聲計音壓與動量關係

(二) 不同放大倍率對應撞擊土砂粒徑

水聲計在不同放大倍率下對通過門檻值的次數判別有所差異，如圖 7-19，泥砂顆粒撞擊水聲管所產生之聲音訊號，經轉換器初步處理後輸出成方波波形，「有效撞擊」之判定方式為方波波形之電壓值高於門檻值 2.5 V(threshold)。

藉由此種差異特性，將可透過不同放大倍率估算粒徑別的土砂量，較大粒徑之土砂顆粒重量較大，其撞擊所產生之音壓，可以在不放大或是較小放大倍率之下即超過門檻值(2.5V)而判定為「有效撞擊」，較小粒徑之土砂顆粒需要以較高之放大倍率，方能使其音壓值超過門檻值(2.5V)。

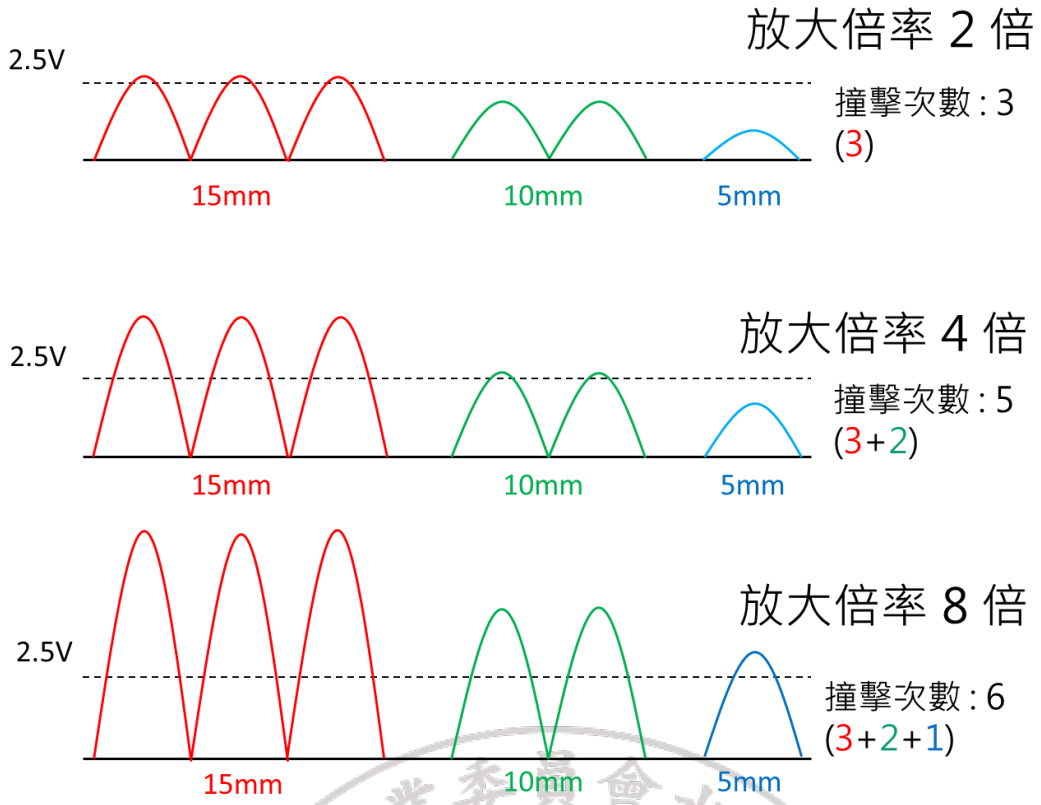


圖7-19 不同放大倍率與土砂粒徑對門檻值之差異示意圖

為釐清土砂粒徑對放大倍率之差異，於室內實驗中利用 5、10、15、20 mm 等四種粒徑進行試驗，試驗之土砂顆粒數皆為 200 顆，試驗渠道之坡度、流速、流量皆為固定，用以探討放大倍率對土砂粒徑之差異及相對偵測率。

(三) 比較不同推估方式對輸砂率之差異

為了解在相同的流況及供砂條件下，利用不同推估方法評估對於輸砂率之差異，推估方式比較 **音壓動量關係推估**、**不同倍率撞擊次數推估** 兩種方式，試驗中使用土砂粒徑為單一粒徑，粒徑大小 20 mm，其餘試驗條件如下表 7-3 所示。

表7-3 不同推估方式對輸砂率之差異試驗條件

| 項次 | 坡度 | 流速(m/s) | 砂重(g) | 歷時(s) | 輸砂率(g/s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.4 | 1.35 | 1667 | 4 | 416.75 |
| 2 | 1.4 | 1.35 | 1667 | 5 | 333.40 |
| 3 | 1.4 | 1.35 | 1667 | 6 | 277.83 |
| 4 | 1.4 | 1.35 | 1510 | 4 | 377.50 |
| 5 | 1.9 | 1.6 | 4405 | 6 | 734.17 |
| 6 | 2.1 | 1.63 | 6230 | 8 | 778.75 |

(四) 室內水聲計渠道試驗

今年度於實驗渠道改設 7.5 mm 厚之水聲計，與過去實驗中 3 mm 水聲計紀錄資料，進行比較（1）相同粒徑下不同厚度水聲計之差異，探討厚度對水聲計聲音訊號之影響，期能推估不同管厚適用之最小粒徑，以供後續設站參考；（2）不同粒徑 7.5 mm 水聲計推估輸砂量-實際輸砂量比較，比較實際通過之土砂輸砂量於所量測撞擊次數差異，以供現場量測資料修正之用；（3）不同粒徑下 7.5 mm 水聲計不同輸砂量推估方砂差異比較，則針對前述不同水聲計推估方法比較其差異及誤差，試驗情境如下表 7-4 所示。

表7-4　室內水聲計渠道試驗情境簡表

| 編號 | 情境 | 採用粒徑 |
|---|---|---|
| 1 | 相同粒徑下<br>不同管厚水聲計差異 | 單一粒徑 |
| 2 | 不同粒徑下 7.5mm 水聲計<br>推估輸砂量-實際輸砂量比較 | 單一粒徑 |
| 3 | 不同粒徑下 7.5mm 水聲計<br>不同輸砂量推估土砂差異比較 | 單一粒徑 |

室內水槽試驗採用之設備包括實驗水槽、供砂設備、試驗用土砂（現地、不同粒徑材質），管式水聲計、水位針尺、攝影機等設備，相關配置詳見圖 7-20，透過定水頭控制穩定流量模擬現地狀況，同樣利用供砂儀器注入水槽，控制上游供砂條件，並於下游設置囚砂箱，量測水位、流速、流量、水聲計聲音訊號、下游攔阻土砂量等，分別將其試驗步驟於下詳述，實驗流程詳見圖 7-21。

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

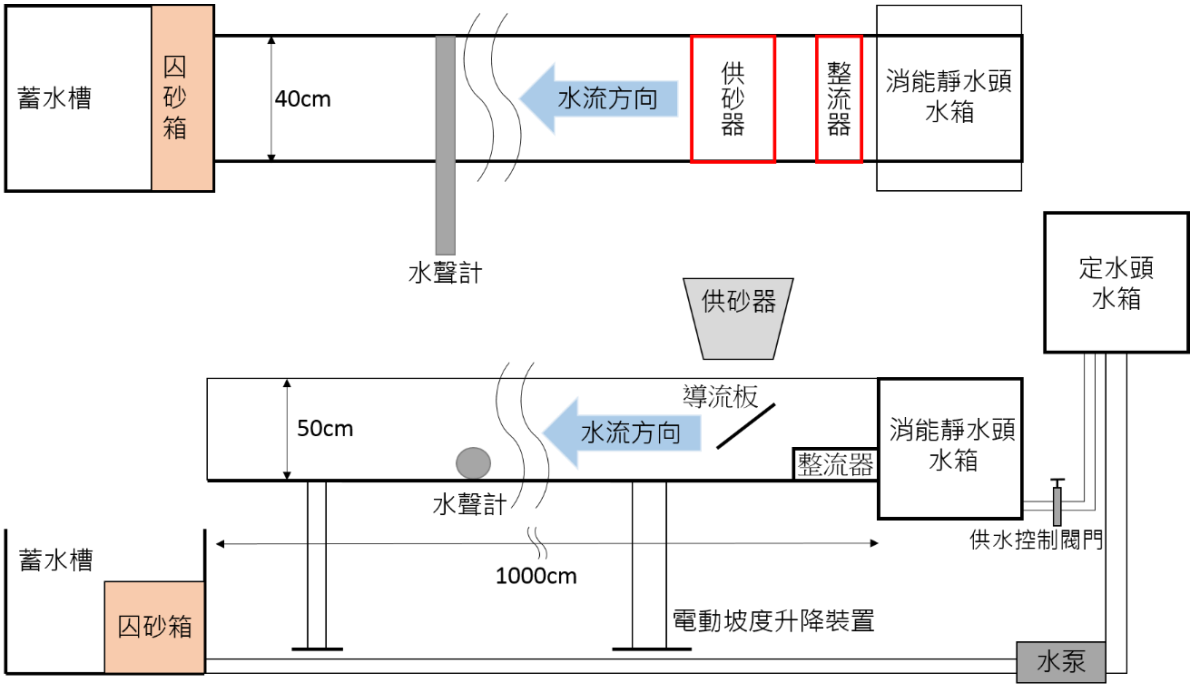


圖7-20 實驗水槽配置圖

1. 架設水聲計以及資料紀錄裝置。
2. 架設攝影設備，進行土砂運移紀錄。
3. 以定水頭固定流量進行供水，於渠道出口端接水進行流量率定，待流量穩定，量測流速後，進行試驗，。
4. 設置囚砂箱於水槽尾端，設置水位針尺於水聲計旁，設置供砂設備於水聲計上游。
5. 啟動供砂裝置，並啟動水聲計、攝影設備等儀器，進行紀錄
6. 停止供砂後待 10 分鐘，擷取水聲計紀錄資料，並將囚砂箱取出，瀝乾後量測其重量。
7. 改變條件（每次僅改變 1 項，條件包括坡度、流量、粒徑大小、土砂材質），依上述步驟重複進行。
8. 根據水聲計撞擊次數紀錄與囚砂箱量測土砂重量以及音壓與動量進行分析。

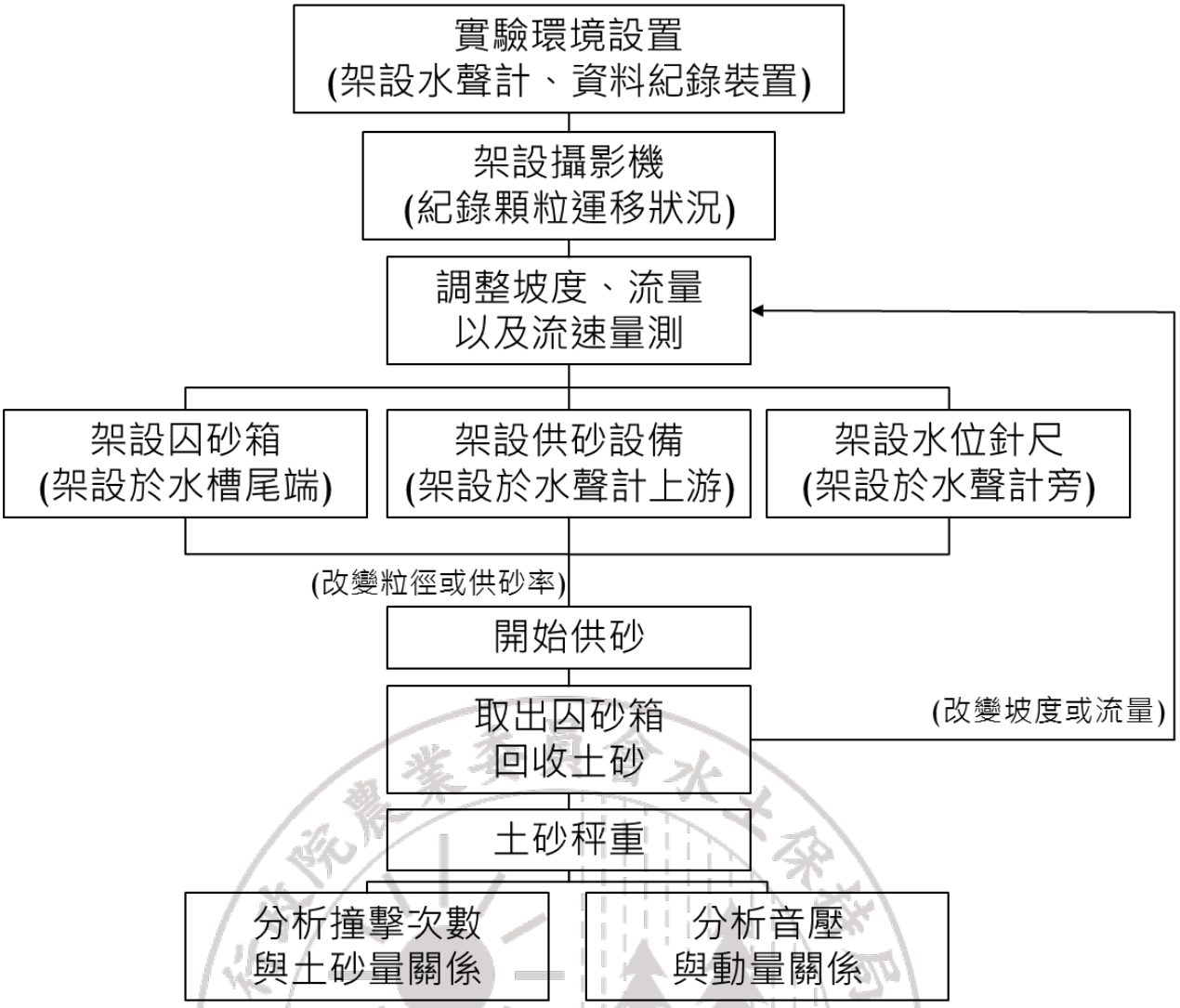


圖7-21 室內水槽試驗流程圖

室內水槽設置參考日本室內實驗，透過於渠道側面之玻璃進行鑽孔後，以U 型環、將水聲計固定於渠道，U 型環與水聲計間利用橡膠包覆，將水聲計裝設於渠道內，並於周圍以橡膠包覆，減低渠道側壁玻璃與水聲計之互相影響，並以防水矽利康（Silicon）阻絕縫隙，如圖 7-22，為避免水聲計於水槽中過於突出，形成擋水區段，將水槽內之實驗範圍段鋪設與渠道坡度相同木板底床，如圖 7-23，令水聲計可以部份設置低於底床之下，藉此模擬現地水聲計裝設狀態，並設置緩坡減少土砂堆積於水聲計上游端，如下圖 7-24 所示，並將於渠道尾端以人力進行囚砂作業，用以分析。



圖7-22 渠道內利用 U 形環及橡膠墊片固定水聲計



圖7-23 水槽內鋪設木板現況

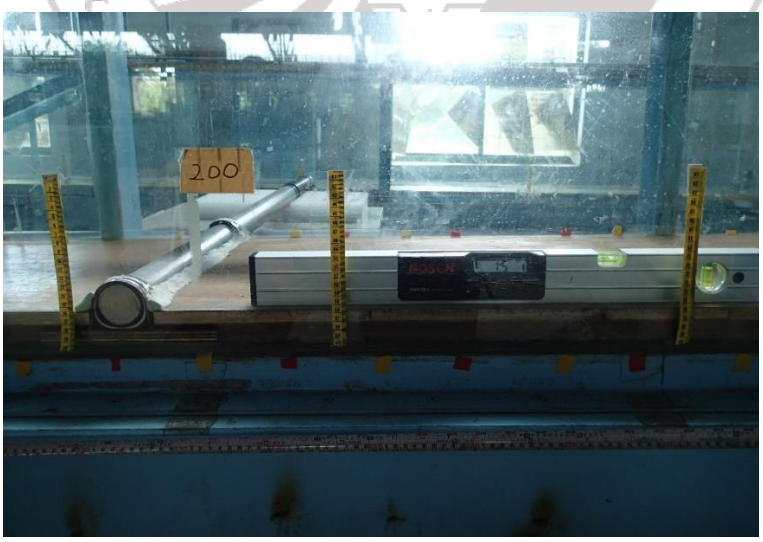


圖7-24 水聲計上下設置緩坡

並於水槽後端設置囚砂箱，收集通過水聲計之土砂，與水聲計所收集之撞擊次數進行比對分析，水槽設置令底床為定床流況運動，減少變數干擾。

供砂量採用與現地相同之重量，擬採以 1～6 kg 不等之多種供砂量進行試驗，供砂時間每次 1 分鐘，觀測時間為 10 分鐘，並視土砂通過水聲計情況修改。

土砂材料以現地取回之土砂材料進行實驗，土砂配比亦與現地相同挑選粒徑分別位於 3/8”～1/2”（9.5mm～12.5mm）、3/4”～1”（19mm～25mm）、1”～3/2”（25mm～37.5mm）之間之土砂顆粒進行試驗，之後視實驗情況修改，並假設顆粒為圓球體，簡化實驗條件。

實驗水槽流量設定最大可達 9800 $cm^3/s$，流量設定利用 9000 $cm^3/s$ 進行試驗，主要以達成土砂底床載運動為原則並參考日本室內實驗條件進行設定。

實驗水槽坡度設定最大可達 5 度，坡度設定將先以現地坡度 2.4％（1.08 度）來進行實驗，後續可於水聲計承受範圍內，嘗試變更坡度(±1 度)情況下的撞擊情形，進行重複試驗，確認其關係。

最後所得之結果，由水聲計紀錄之聲音訊號可得到不同放大倍率撞擊次數，初步可得到水聲計撞擊次數與底床載輸砂量之關係，根據統計回歸結果，選取較適合之放大倍率，以及可利用音壓與動量關係推估底床載輸砂量實驗。

# 第三節　試驗資料收集與成果分析

## 一、音壓與動量關係試驗

完成不同管厚（3 mm、7.5 mm）水聲計之音壓動量關係比較，如下圖 7-25，由圖中可明顯看出與同樣動量之鋼球，3 mm 管厚水聲計所得之音壓值，相對於 7.5 mm 管厚水聲計所得音壓值要來得大之趨勢，於動量為 4(g*m/s)下 3 mm 管厚水聲計所得之音壓值為 400～500 mVolts，相對於 7.5 mm 管厚水聲計僅為 40～50 mVolts 將近 10 倍之差異，故可知 7.5 mm 管厚對於動量較小之撞擊其敏感度會相對下降，意即可偵測最小粒徑尺寸上升。

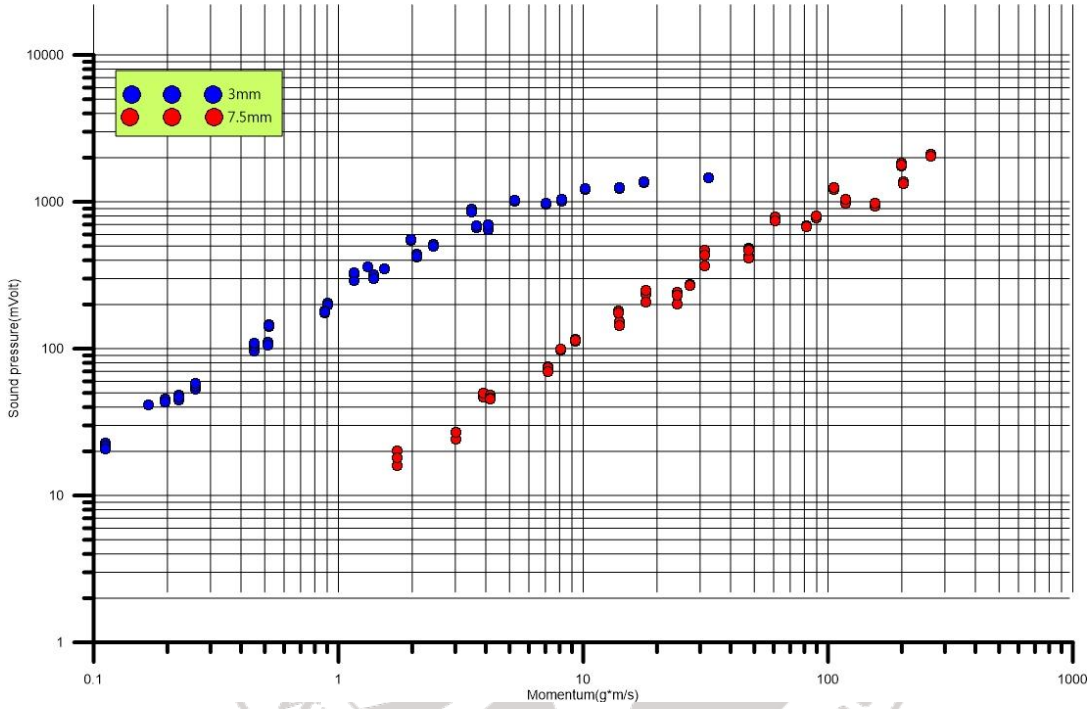


圖7-25 3mm、7.5mm 管厚水聲計音壓動量關係比較圖

今年度因現地水聲管強化改善其金屬管管徑為 7.5 mm，故實驗室渠道水聲管亦改為 7.5 mm，重新設置水聲管後進行音壓動量率定，並調整為與現地相似之音壓動量關係曲線，其測試結果如下圖 7-26 所示，利用與現地相同率定方式之垂直落下測試，以及室內斜坡落下測試，如圖 7-27，其成果大致貼近現地率定曲線，故可認為其呈現反應為相似結果。

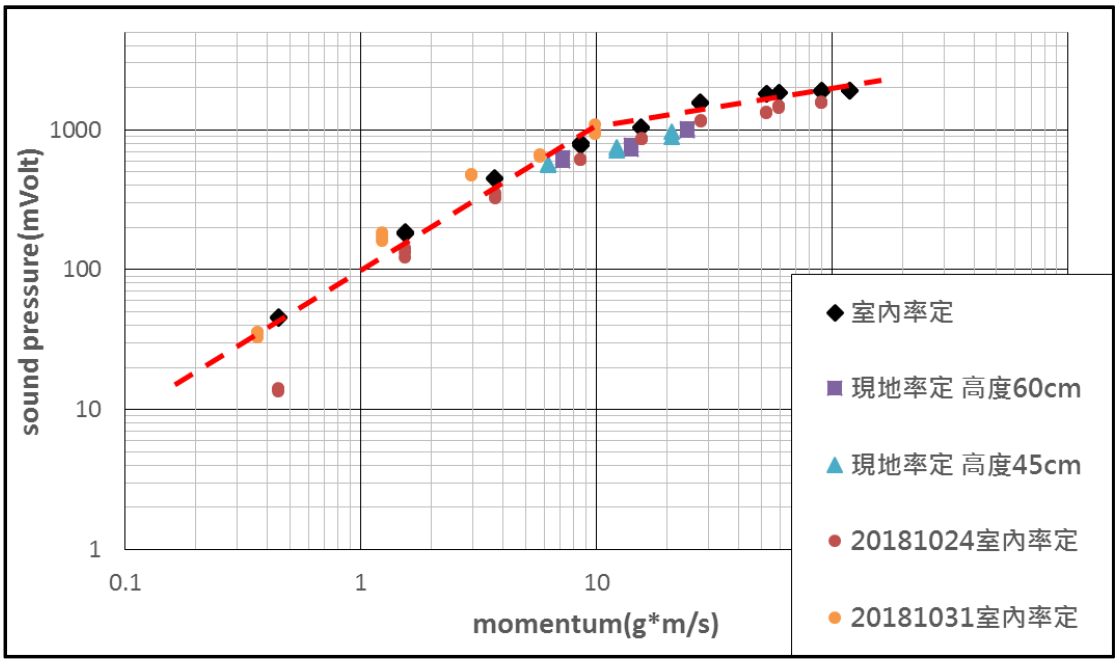


圖7-26 室內渠道音壓動量率定成果

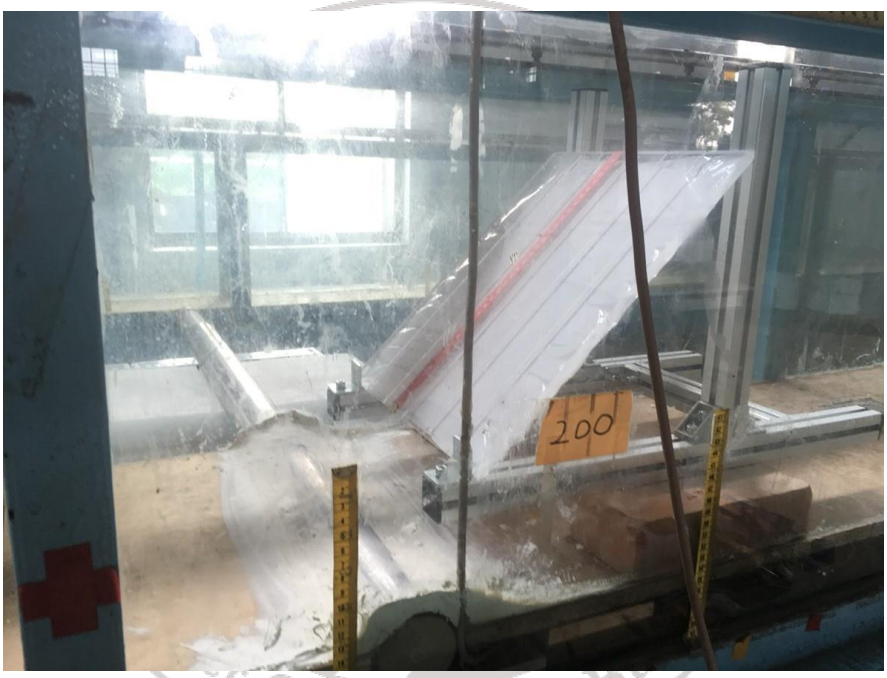


圖7-27 室內渠道水聲計斜坡落下測試

二、不同放大倍率對應撞擊土砂粒徑

試驗結果詳見下表 7-5、圖 7-28，結果中發現 5 mm 於放大倍率 32 倍有明顯撞擊次數的產生，若放大倍率更小的話則不會有次數反應，10 mm 於放大倍率 16 倍有明顯撞擊次數，15 mm 於 8 倍有明顯撞擊次數，20 mm 於 4 倍就會有明顯撞擊次數。

表7-5　不同放大倍率及不同土砂粒徑之偵測率

| | CH.128 | CH.64 | CH.32 | CH.16 | CH.8 | CH.4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5mm | 6.0% | 3.6% | 2.2% | 0.4% | 0.0% | 0.0% |
| 10mm | 12.2% | 9.9% | 7.6% | 4.8% | 0.3% | 0.0% |
| 15mm | 14.0% | 11.4% | 10.3% | 8.4% | 4.9% | 0.3% |
| 20mm | 40.0% | 32.3% | 29.0% | 26.4% | 21.3% | 13.7% |

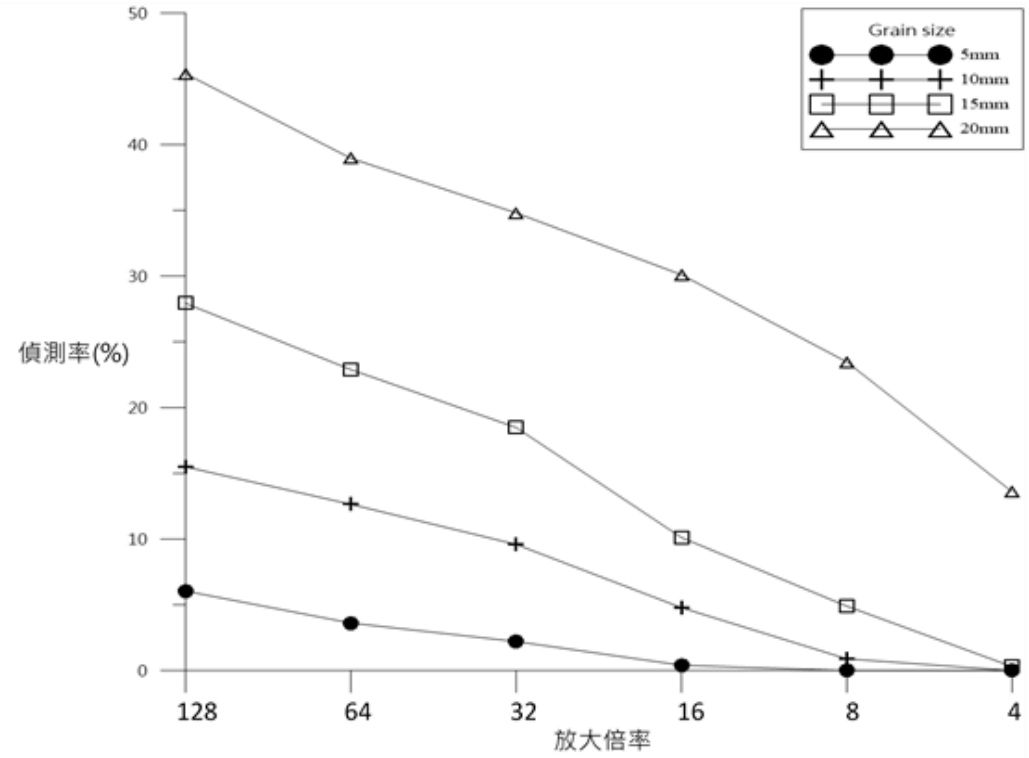


圖7-28 不同放大倍率及不同土砂粒徑之偵測率

透過粒徑對放大倍率呈現之差異特性，便可進行土砂量的推估，依據實驗結果設定放大倍率之門檻粒徑，放大倍率 4 倍為 20 mm，放大倍率 8 倍為 15 mm，放大倍率 16 倍為 10 mm，放大倍率 32 倍為 5 mm。

**總輸砂量** ＝ ④＊$P_{20}$＋（③－④）＊$P_{15}$＋（②-③）＊$P_{10}$＋（①－②）＊$P_5$

其中$P_{20}$ 、$P_{15}$、$P_{10}$ 、$P_5$ 表示各代表粒徑之土砂顆粒質量

①、②、③、④為所對應之放大倍率之撞擊次數

三、比較不同推估方式對輸砂率之差異

試驗後依據量測結果進行輸砂量推估，並與實際輸砂量進行比較(如圖 7-29)，發現兩種方式之量測推估重量與實際供給重量有所低估，約為實際重量的 25%。

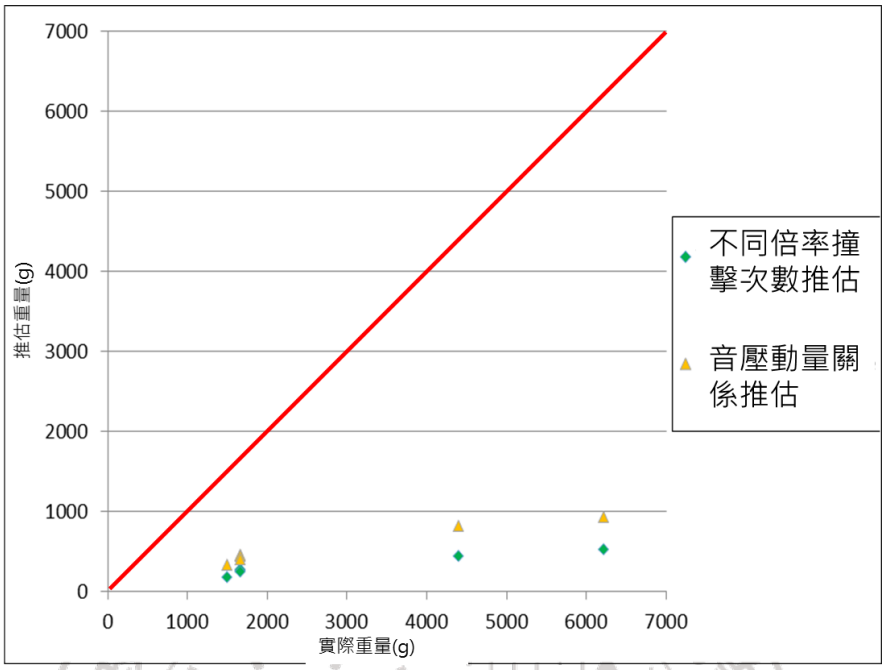


圖7-29 不同推估方式之輸砂量推估與實際值關係

不同倍率撞擊次數推估方式中，重量低估之誤差來源主要為水聲計所偵測到的顆粒數會低於實際的顆粒數，而偵測低估之主要原因為土砂顆粒在水流中之移動方式，存在躍移之情形，可能直接跳過水聲計而未能撞擊，因而造成量測低估，故需針對顆粒數的低估加以修正。

為確認不同流速條件下之顆粒偵測率之影響，透過確認土砂顆粒之臨界啟動條件之無因次剪應力，與量測顆粒數對實際顆粒數之比值，來進行推估量之修正，實驗結果中對於土砂粒徑 20mm 之偵測率大約為 30~40%，如下圖 7-30，根據偵測率的差異值，對不同倍率撞擊次數推估之推估結果進行修正，如圖 7-31。

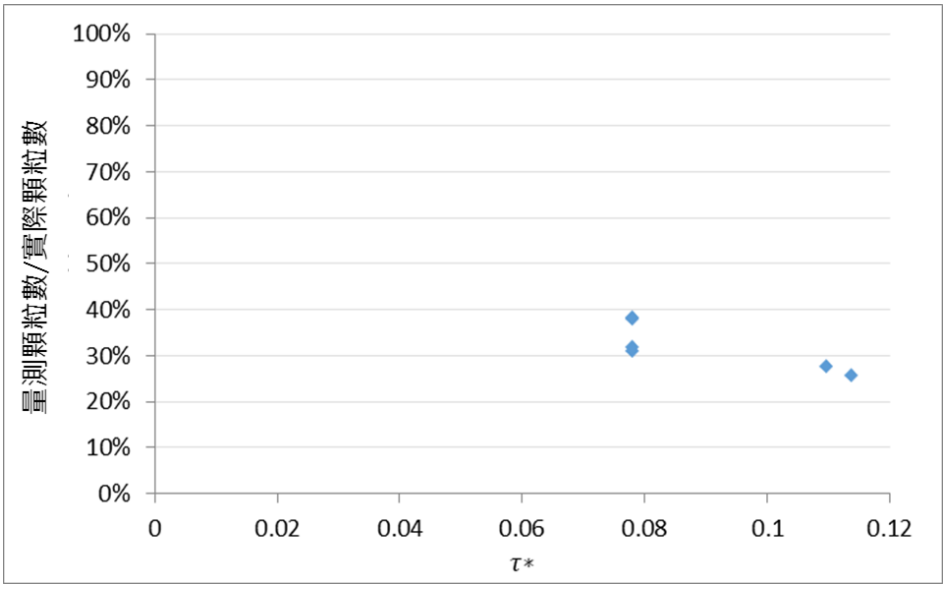


圖7-30 不同無因次剪應力下之顆粒數偵測差異

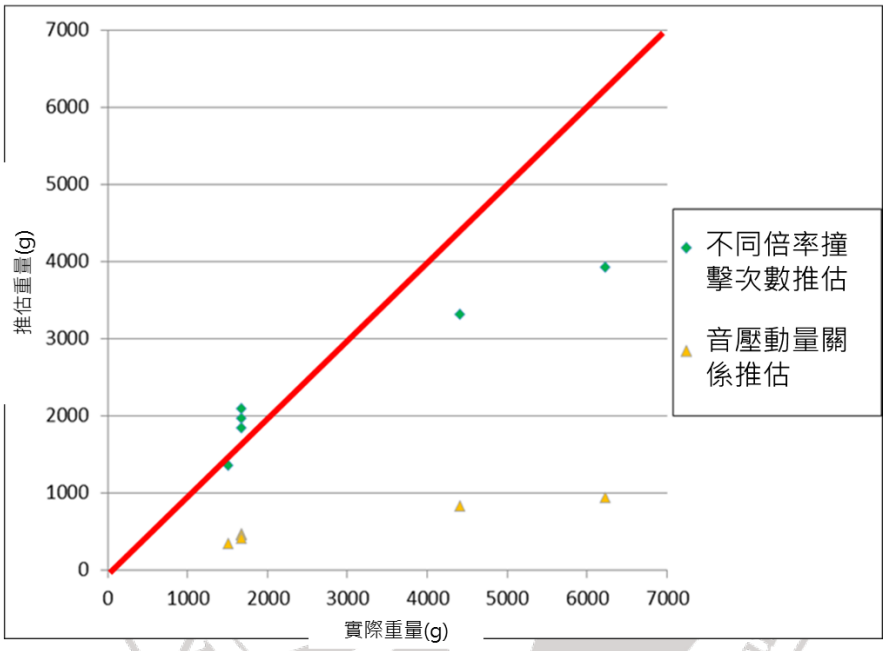


圖7-31 不同倍率撞擊次數推估結果修正

音壓動量關係推估中，重量低估之誤差來源為撞擊過程中，土砂顆粒表現之音壓值並不一致，如圖 7-32，觀察相同流況條件之音壓動量曲線對於顆粒大小之偵測結果，有 70%之顆粒粒徑會遭到低估。

為確認不同流速條件下之輸砂量偵測率之影響，透過確認土砂顆粒之臨界啟動條件之無因次剪應力，與量測輸砂量對實際輸砂量之比值，來進行推估量之修正，如圖 7-33，實驗中另發現不同顆粒速度推估方式亦可能為輸砂

率差異來源，透過芦田式所推估顆粒速度大於透過影像紀錄所推估顆粒速度。

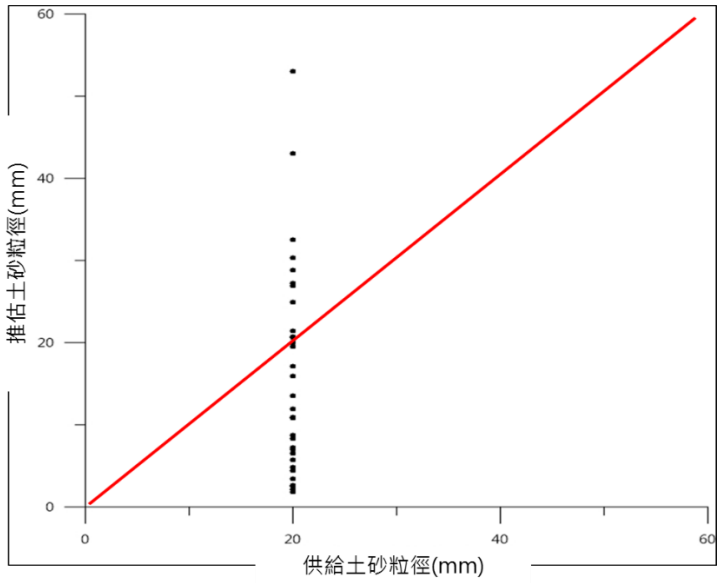


圖7-32 音壓動量曲線對於顆粒大小之偵測

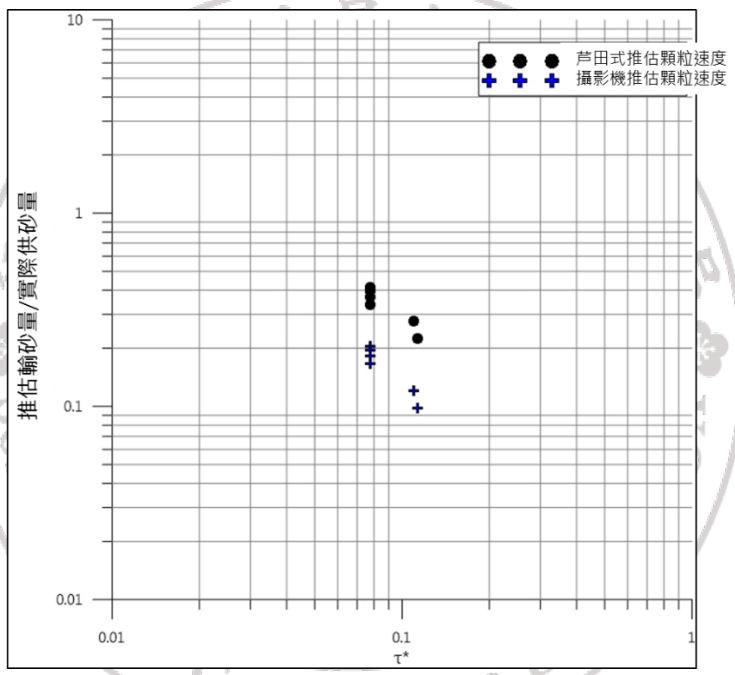


圖7-33 不同無因次剪應力下之輸砂量偵測差異

透過偵測差異結果推導出修正係數，進行音壓動量關係推估之修正，推估結果如下圖 7-34，兩種方式推估量修正後已較為近似實際供砂量。

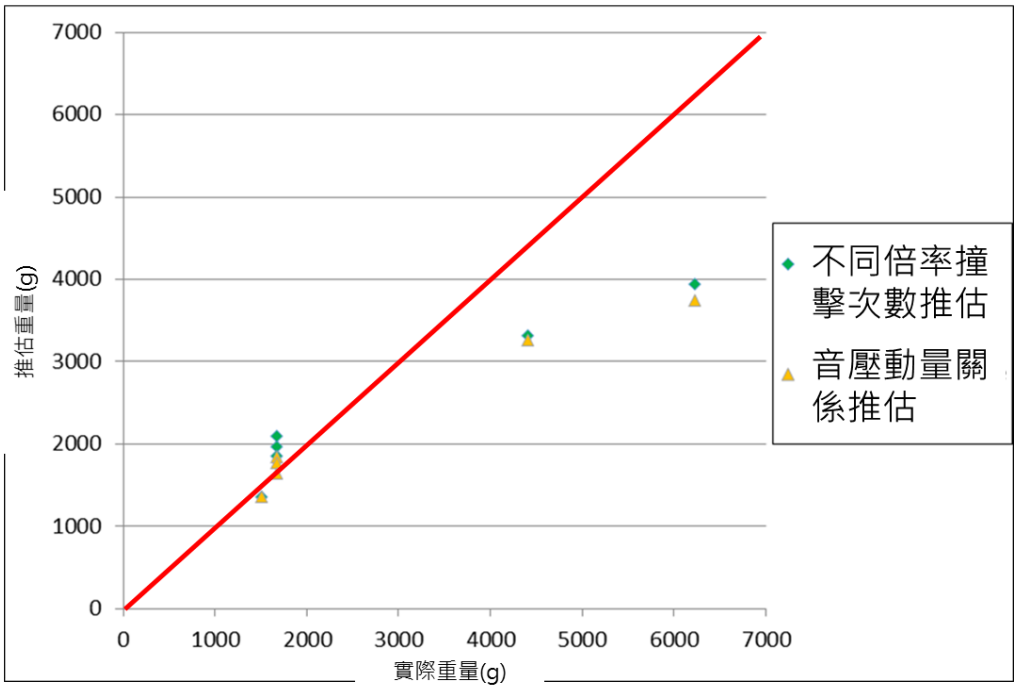


圖7-34 不同推估方式之推估結果修正

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

四、偵測率試驗

試驗中流量設定為 9000 $cm^3/s$，渠道坡度使用 1～3 度進行測試，水流流速約為 1.4～1.8 之間，詳如下表 7-6 所示，使用土砂粒徑為 3/8”～1/2”(9.5mm～12.5mm)(以下簡稱為 10mm)、3/4”～1”(19mm～25mm)(以下簡稱為 20mm)、1”～3/2”(25mm～37.5mm)(以下簡稱為 30mm)之間之土砂顆粒，各以 100 顆進行撞擊測試，觀察其不同顆粒於不同流速下之撞擊反應，試驗成果如圖 7-35～圖 7-37 所示，過去以 3 mm 管厚之水聲管進行試驗，於坡度 1.5 度，流速 1.22 m/s 下測試，於 10 mm 粒徑偵測率最大約為 33%，20 mm 粒徑偵測率最大約為 60%。

表7-6　試驗坡度與相對流速

| 渠道坡度($^0$) | 渠道流速(m/s) |
|---|---|
| 1 | 1.45 |
| 2 | 1.51 |
| 3 | 1.74 |

試驗粒徑為 10mm 顆粒時，由於質量較小，動能也較小，故低放大倍率所能偵測到的比例較低，為了維持一定的偵測敏感度，且不希望偵測率受外在水理條件而有太大的波動，以 256 倍及 512 倍兩個放大倍率作為直徑 10mm 之泥砂的偵測倍率較為適宜。

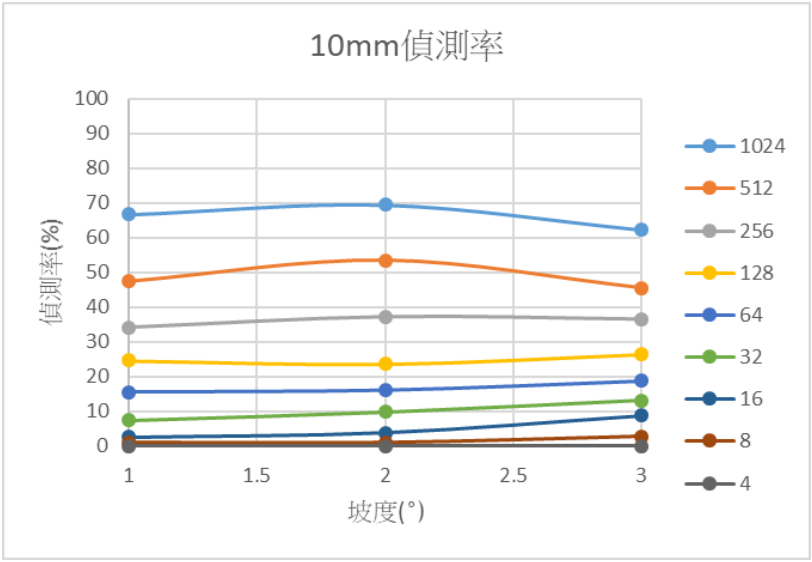


圖7-35 10 mm 顆粒偵測率試驗成果

試驗粒徑為 20mm 顆粒時，由於質量較大，故其撞擊渠道底部時的聲響也會被較高放大倍率的頻道誤判為撞擊，因此為了消除誤判及維持一定的偵測敏感度，以 128 倍作為直徑 20mm 之泥砂的偵測倍率較為適宜。

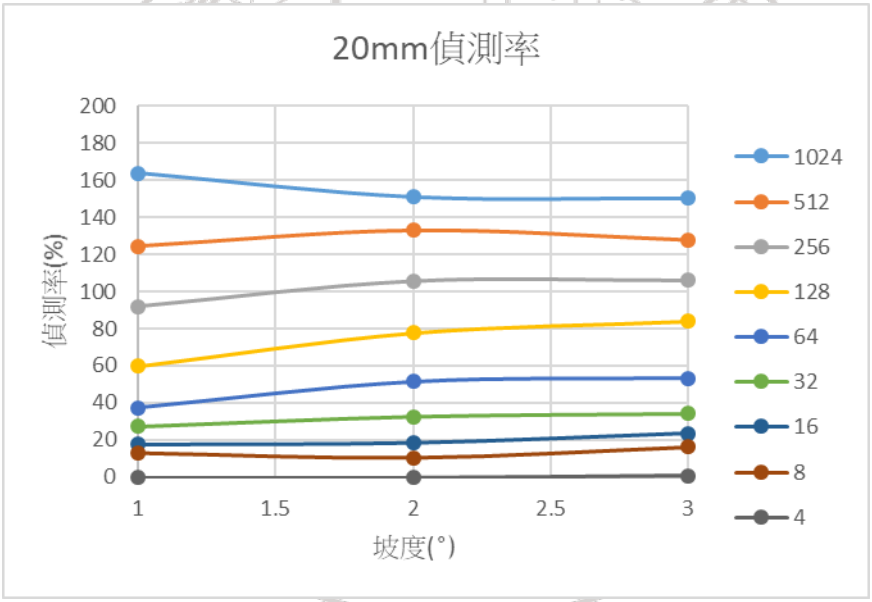


圖7-36 20 mm 顆粒偵測率試驗成果

試驗粒徑為 30mm 顆粒時，高放大倍率誤判的情況更為嚴重，因此我們選擇更小的 32X 及 64X 作為直徑 30mm 之泥砂的偵測倍率較為適宜。

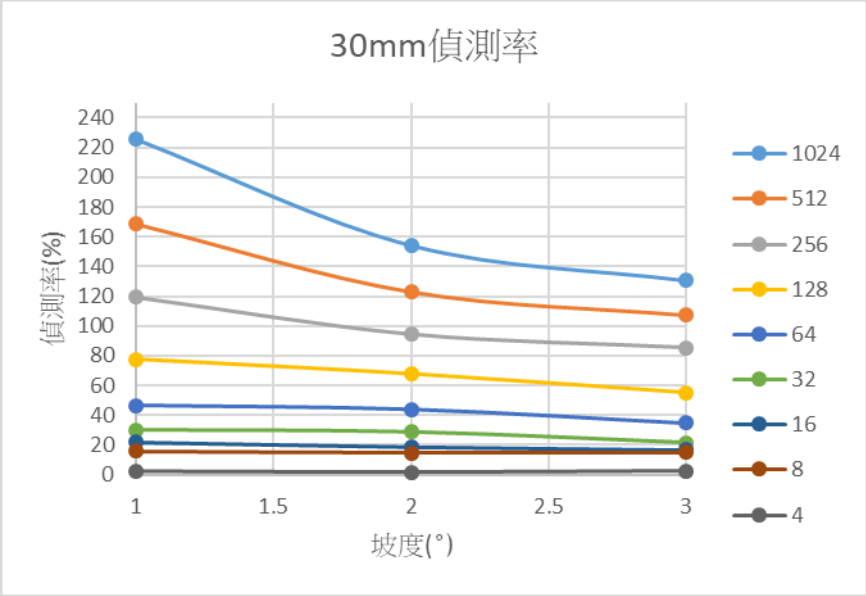


圖7-37 30 mm 顆粒偵測率試驗成果

透過偵測率試驗結果，發現對於試驗環境還需進行相關調整，於較大顆粒的試驗中，水聲計於高放大倍率之反應出現偵測率大於 100%之情況，可能原因有土砂顆粒移動過程中，與木板表面之碰撞音響，被水聲計收集紀錄下來，導致撞擊次數的高估，此一現象於試驗過程中的即時監控，便已確認到此狀況，將尋思如何減少撞擊渠道所產生之雜訊，另一原因可能為，土砂顆粒在撞擊水聲計時，出現多次撞擊的情形，導致撞擊次數的高估，如欲減少多次撞擊發生，將需要透過土砂顆粒形狀挑選，儘量選擇較為圓滑之土砂顆粒，避免於通過水聲計時卡住而產生多次撞擊。

比較前後期偵測率差異，認為主要受流速不同所影響，較高流速下土砂顆粒動量較大，使得水聲計偵測顆粒數較多，令管壁較厚之 7.5 mm 水聲管偵測率高於管壁較薄之 3.0 mm 水聲管。

五、輸砂量變化試驗

試驗中流量試驗中流量設定為 9000 $cm^3/s$，渠道坡度使用 1 度進行測試，水流流速約為 1.44 m/s，使用土砂粒徑為 3/8”～1/2”（9.5mm～12.5mm）(以下簡稱為 10mm)、3/4”～1”（19mm～25mm）(以下簡稱為 20mm)、1”～3/2”（25mm～37.5mm）(以下簡稱為 30mm)之間之土砂顆粒，各以 1～6 公斤土砂量進行撞擊測試，觀察其不同顆粒於不同輸砂量下之撞擊反應，試驗成果如圖 7-38～圖 7-40 所示。

試驗粒徑為 10 mm 顆粒時，可發現 4 倍及 8 倍放大倍率，並未隨輸砂量增加而增加撞擊次數，此與前述偵測率試驗結果相符，可知 10 mm 之粒徑於此流況下，難以觸發 4 倍及 8 倍放大倍率之反應，其餘放大倍率之撞擊次數反應皆隨供砂量增加，而有所增加，且呈現良好線性關係。

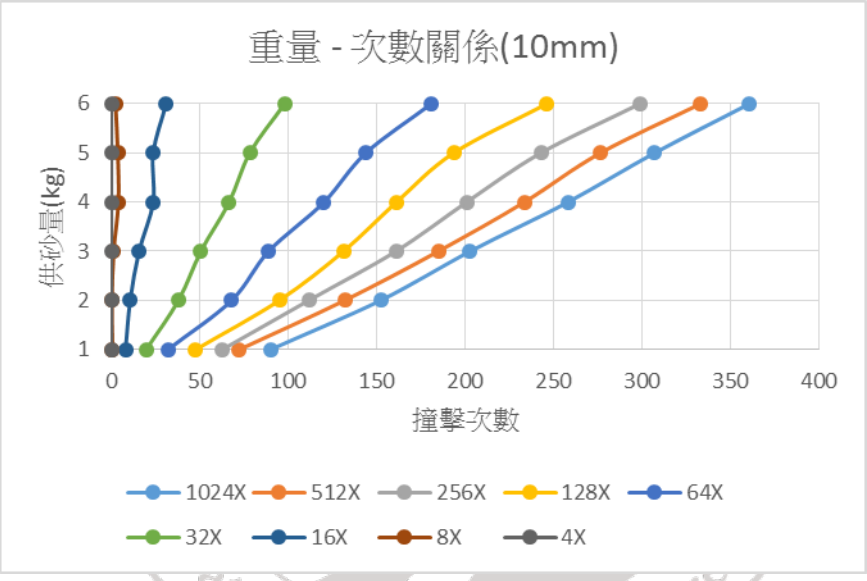


圖7-38 10 mm 顆粒輸砂量試驗成果

試驗粒徑為 20mm 顆粒時，4 倍及 8 倍放大倍率已有較多之撞擊反應，且整體撞擊次數反應與輸砂量變化，呈現良好線性關係。

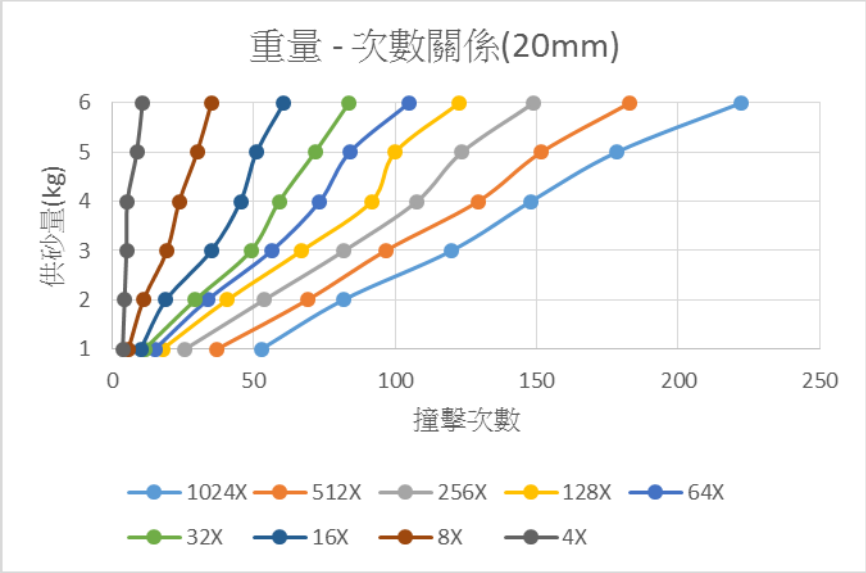


圖7-39 20 mm 顆粒輸砂量試驗成果

試驗粒徑為 30mm 顆粒時，雖整體反應可能因土砂顆粒形狀不同，而略有變化，但整體撞擊次數反應隨著輸砂量變化而有所增加，呈現良好線性關係。

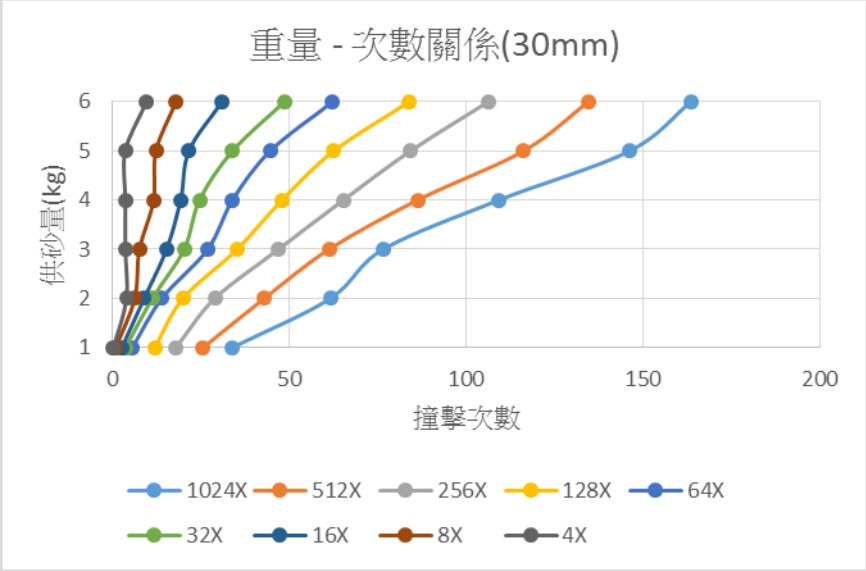


圖7-40 20 mm 顆粒輸砂量試驗成果

透過不同粒徑以及不同輸砂量所呈現之水聲計撞擊次數反應，可得知水聲計可反應出輸砂量多寡之差異，雖土砂運移過程中可能出現躍移或滑移等可能影響撞擊反應之情形，但對量體多寡仍足以反應其變化狀況。


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 第八章　現地監測成果綜合分析

## 第一節　現地監測資料分析

本計畫所收集之現地監測資料包括監測示範站水位、濁度、底床流速、水聲計撞擊次數以及雨量（氣象局甲仙站）等，將其繪製成以時間為橫軸之歷線圖，本計畫監測成果將採以降雨事件時間進行區分以及分析，今年度至目前遭遇 5 場強降雨事件，分別為 0613 豪雨、0619 豪雨、0702 豪雨、0823 熱帶低壓、山竹颱風，事件區間主要依據水土保持局台南分局災害應變中心開設及結束時間，如表 8-1 所示，來擷取事件區段整日資料進行分析。

表8-1　107 年度水土保持局台南分局災害應變中心開設時間

| 降雨事件 | 災害應變中心開設日 | 災害應變中心結束日 |
|---|---|---|
| 0613 豪雨 | 107/06/13 | 107/06/15 |
| 0619 豪雨 | 107/06/19 | 107/06/21 |
| 0702 豪雨 | 107/07/02 | 107/07/04 |
| 0823 熱帶低壓 | 107/08/23 | 107/08/30 |
| 山竹颱風 | 107/09/14 | 107/09/16 |

### 一、0613 豪雨

0613 豪雨期間相關監測記錄如圖 8-1～圖 8-3 所示，於甲仙站雨量紀錄總雨量為 98.5 mm（107/06/13 00:00 ～ 107/06/16 00:00），事件期間因新裝設之囚砂箱剛完成，現地圍水土堤尚未恢復，故裝設於右岸的水位計與濁度計並未能接觸到水面，新設於左岸的水位計最大水深為 38.5 cm，降雨期間上升 32 cm。

因此次降雨事件其降雨強度較小（1 小時最大降雨強度為 21.5 mm），故事件期間水聲計、濁度計與水位計無明顯反應，流速計降雨集中時段獲得部分紀錄資料，最大流速為 0.796 m/s，此最大流速與過去進行現地試驗之流速相較較小，難以使現場土砂顆粒進行運移。

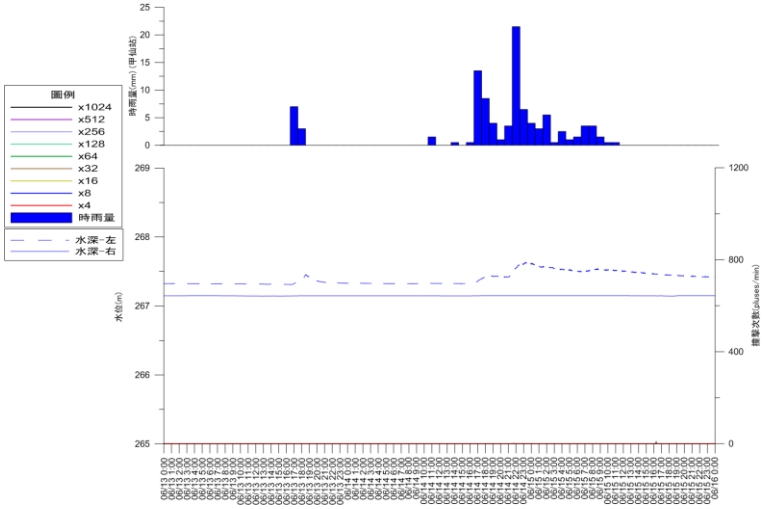


圖8-1 0613 豪雨-水聲計撞擊次數及左、右岸水位計與時雨量紀錄

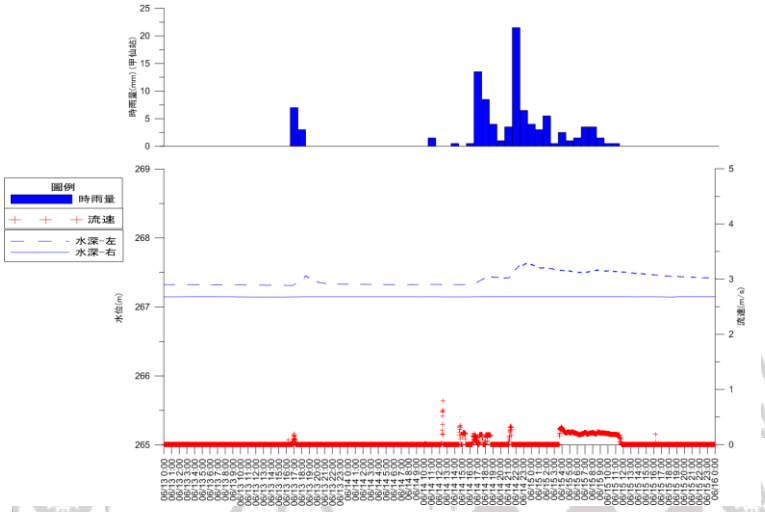


圖8-2 0613 豪雨-底床流速計及左、右岸水位計與時雨量紀錄

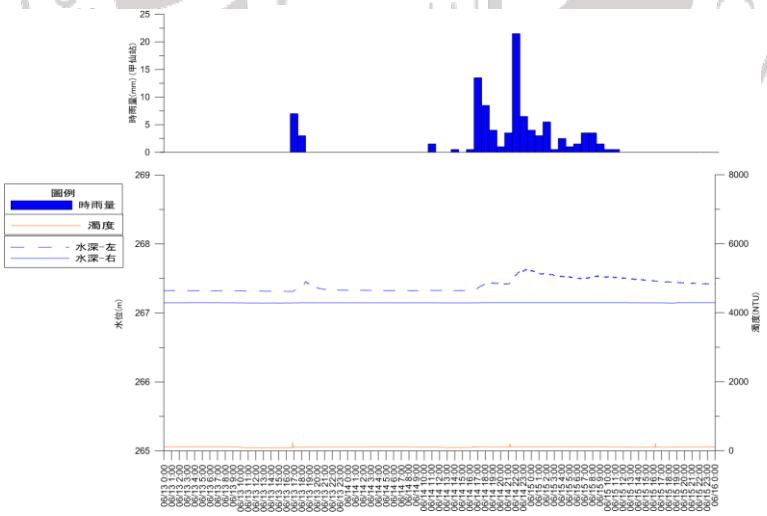


圖8-3 0613 豪雨-濁度計及左、右岸水位計與時雨量紀錄

## 二、0619 豪雨

0619 豪雨期間相關監測記錄如圖 8-4～圖 8-6 所示，於甲仙站雨量紀錄總雨量為 257.0 mm（107/06/19 00:00 ～ 107/06/22 00:00），1 小時最大降雨強度 39.0 mm，由現場水深及雨量紀錄發現到在達到最大水深（6 月 19 日 04:21，左岸水位計 83.0 cm）前一小時，因降雨量突增，水聲計開始收集到撞擊紀錄，音訊放大 1024 倍之頻道最大紀錄次數為 1077 次/分，且可發現到撞擊次數隨著水深變化而有所增減（見圖 8-4），左、右岸的水深變化，兩者之間變化趨勢一致，左岸因位處轉彎處外側，故降雨事件過程中水深略高於右岸。

底床流速計於事件期間量測到最大底床流速為 2.379 m/s，事件過程中量測穩定度隨著水深變化，當水深開始下降，底床流速計便受土砂沉積干擾，導致量測值起伏不定，待降雨減少後，河道水流運移土砂量下降階段，底床流速計方有較穩定之數值紀錄（見圖 8-5）。

濁度計於事件初期水深上漲時量測到最大濁度值 4364 NTU，隨後便因保護管處土砂淤積導致量測失準，後續水深變化階段雖有部分恢復，但因未能了解淤積狀況，量測數值已不可信（見圖 8-6）。

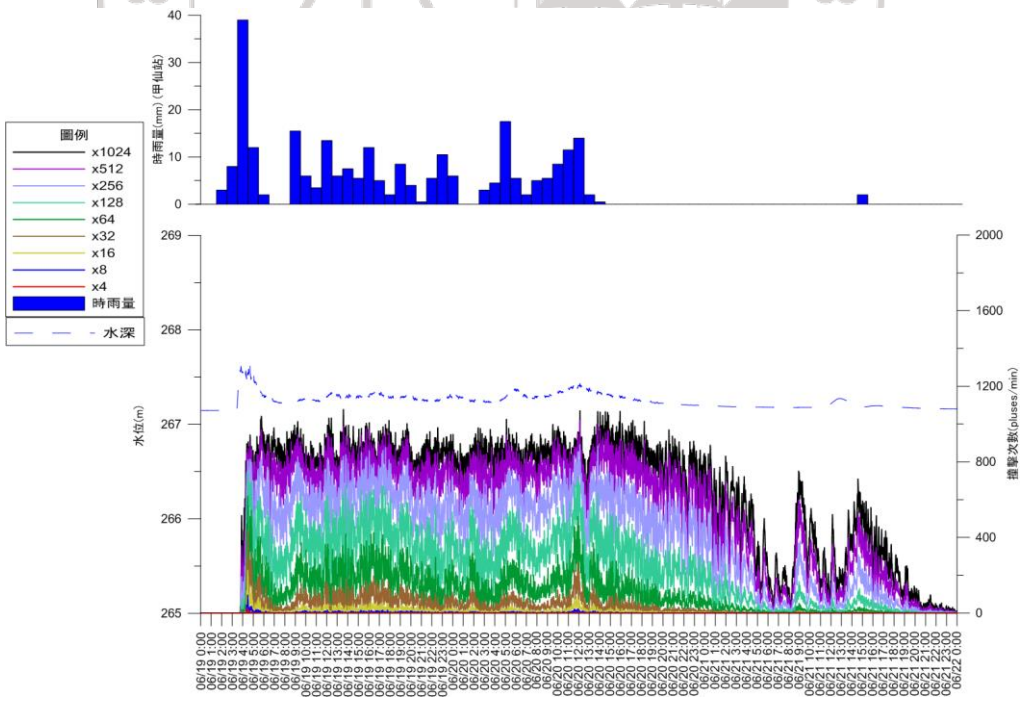


圖8-4 0619 豪雨-水聲計撞擊次數及左岸水位計與時雨量紀錄

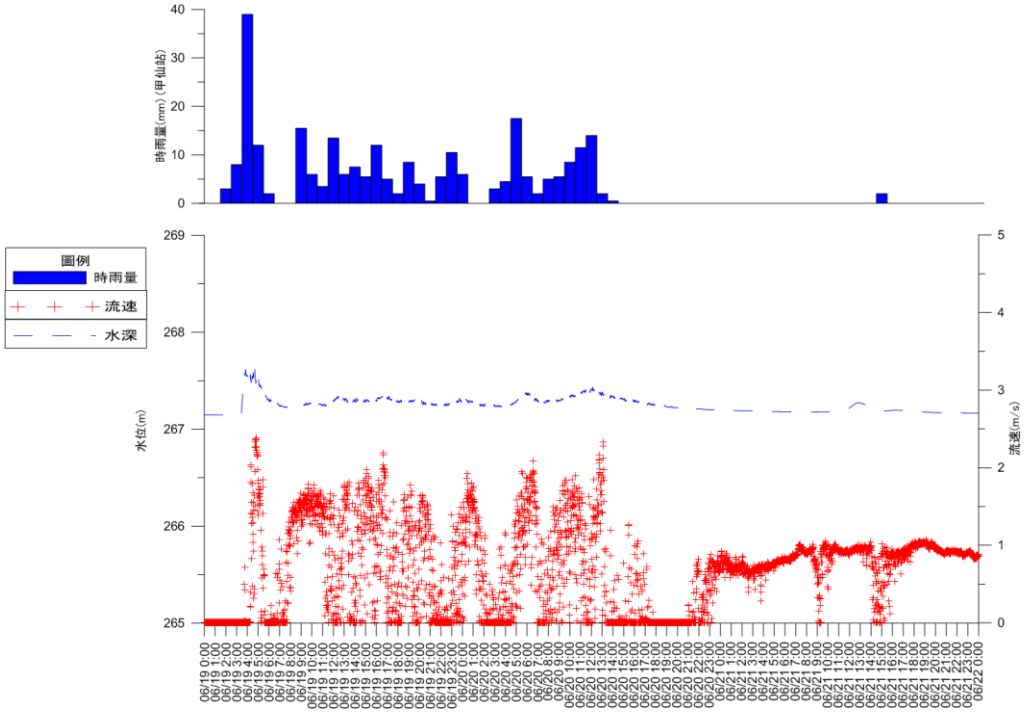


圖8-5 0619 豪雨-底床流速計及左岸水位計與時雨量紀錄

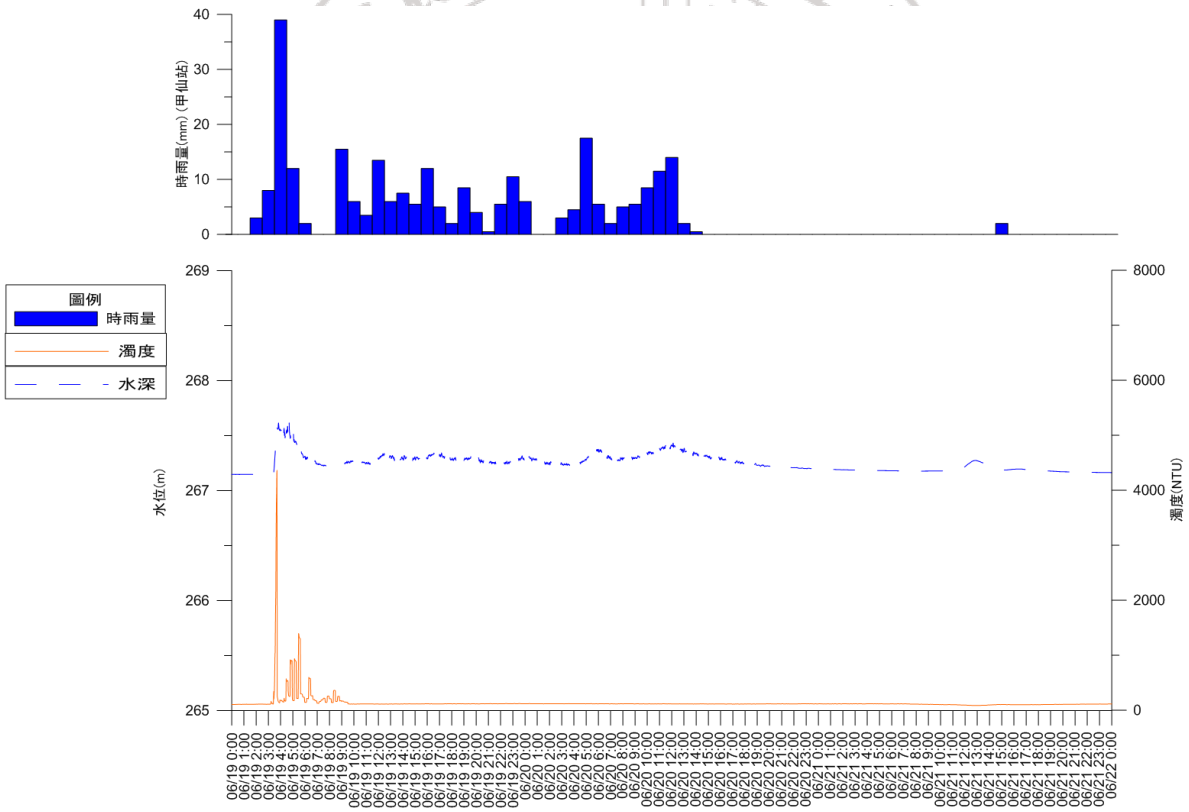


圖8-6 0619 豪雨-濁度計及左岸水位計與時雨量紀錄

三、0702 豪雨

0702 豪雨期間相關監測記錄如圖 8-7～圖 8-9 所示，於甲仙站雨量紀錄總雨量為 284.0 mm（107/07/02 00:00 ～ 107/07/05 00:00），1 小時最大降雨強度 26.5 mm，水位最大變化值達 60.0 cm，此次事件水土保持局台南分局災害應變中心雖只開設至 7 月 5 日，但因現場持續有土砂顆粒撞擊水聲管，故資料觀察上時間延伸至 7 月 10 日。

由現場水深及雨量紀錄發現在初期，因連日午後陣雨影響，河道水流維持一定水深與流速，水聲計持續收集到撞擊紀錄，但此階段主要為較小粒徑之土砂顆粒，因主要撞擊次數反應於放大倍率 1024 倍、512 倍、256 倍之頻道，較小之放大倍率頻道未能有撞擊次數記錄，音訊放大 1024 倍之頻道於降雨事件中最大紀錄次數為 1207 次/分，且可發現到撞擊次數隨著水深變化而有所增減（見圖 8-7）。

底床流速計於事件期間量測到最大底床流速為 2.706 m/s，事件過程中量具量測穩定度隨著水深變化，當水深開始下降，底床流速計便受土砂沉積干擾，導致量測值起伏不定，待降雨減少後，河道水流運移土砂量下降階段，底床流速計方有較穩定之數值紀錄（見圖 8-8）。

濁度計於事件初期水深上漲時量測到最大濁度值 4112 NTU，隨後便因保護管處土砂淤積導致量測失準，後續水深變化階段雖有部分恢復，但因未能了解淤積狀況，量測數值已不可信（見圖 8-9）。

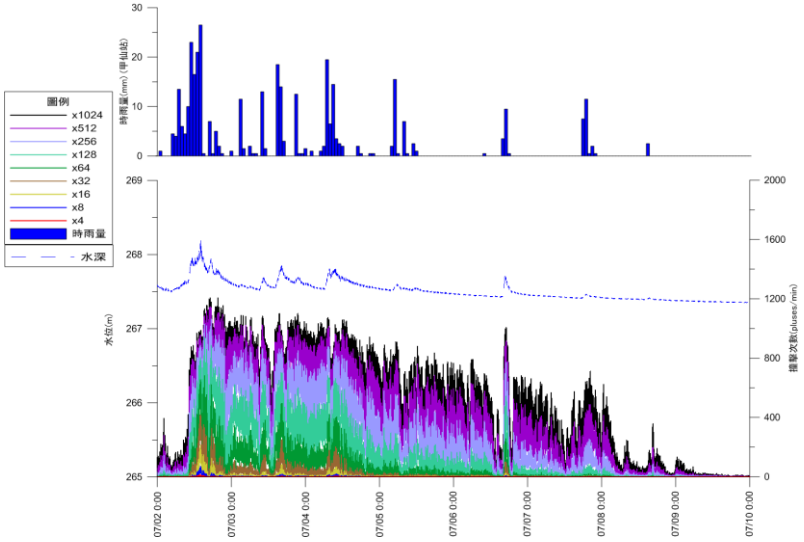


圖8-7 0702 豪雨-水聲計撞擊次數及右岸水位計與時雨量紀錄

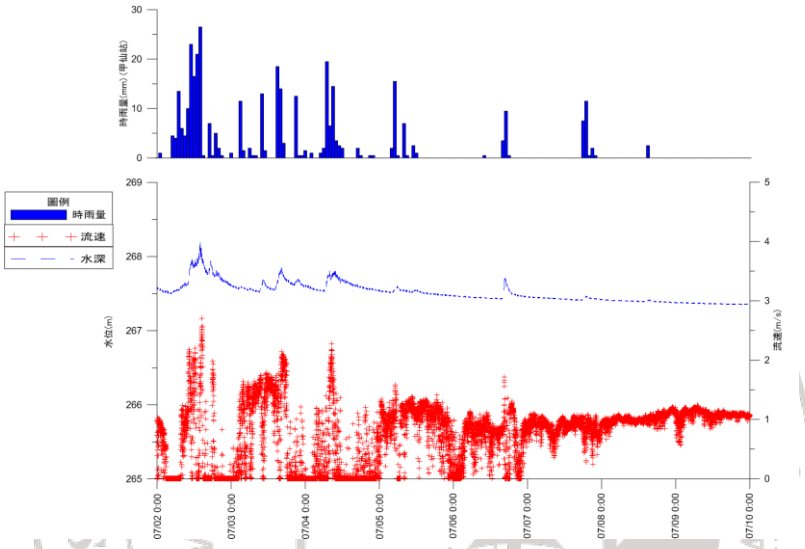


圖8-8 0702 底床流速計及右岸水位計與時雨量紀錄

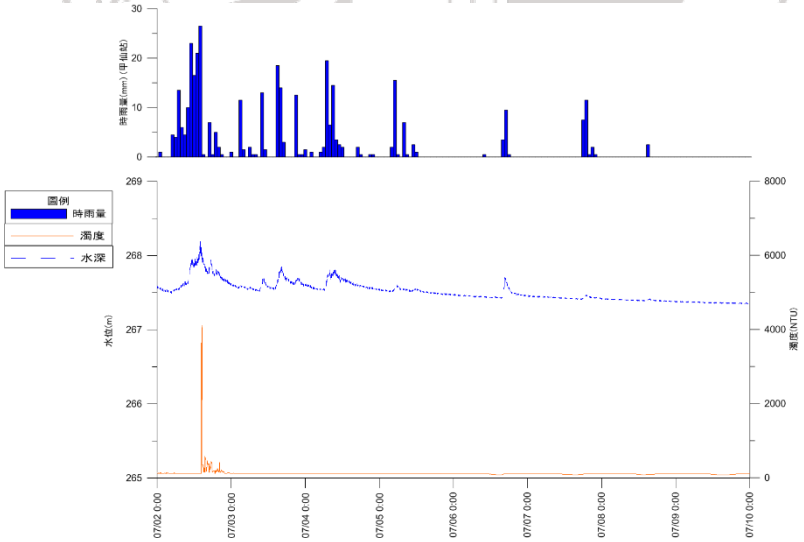


圖8-9 0702 豪雨-濁度計及右岸水位計與時雨量紀錄

四、0823 熱帶低壓

0823 熱帶低壓期間相關監測記錄如圖 8-10～圖 8-12 所示，於甲仙站雨量紀錄總雨量為 1000.5 mm（107/08/23 00:00 ～ 107/08/31 00:00），3 小時最大降雨強度 89.5 mm，水位最大變化值達 151.0 cm，此次事件土砂顆粒撞擊水聲管主要集中在強降雨期間，8 月 23 日~8 月 24 日以及 8 月 28 日期間。

由現場水深及雨量紀錄發現在 0823 熱帶低壓初期，因熱帶低壓影響，河道水流流量突然提高，可見水深與流速突升，水聲計開始收集到撞擊紀錄，音訊放大 1024 倍之頻道於降雨事件中最大紀錄次數為 1209 次/分，且可發現到撞擊次數隨著水深變化而有所增減（見圖 8-10）。

底床流速計於事件期間量測到最大底床流速為 5.107 m/s，事件過程中於初期隨著水深變化，但於 8 月 24 日 07:45，突然顯示為 0 值，於事後維護發現底床流速計，表面嚴重磨損，故於 8 月 24 日可能已失去量測功能，非先前隨水位下降受土砂覆蓋之情形（見圖 8-11）。

濁度計於事件初期水深上漲時量測到最大濁度值 5132 NTU，後續隨水深變化而有浮動，此次事件中因河道深槽改至右岸，故事件後維護未發現保護管有淤塞情形，此次事件量測數值應較為可信（見圖 8-12）。

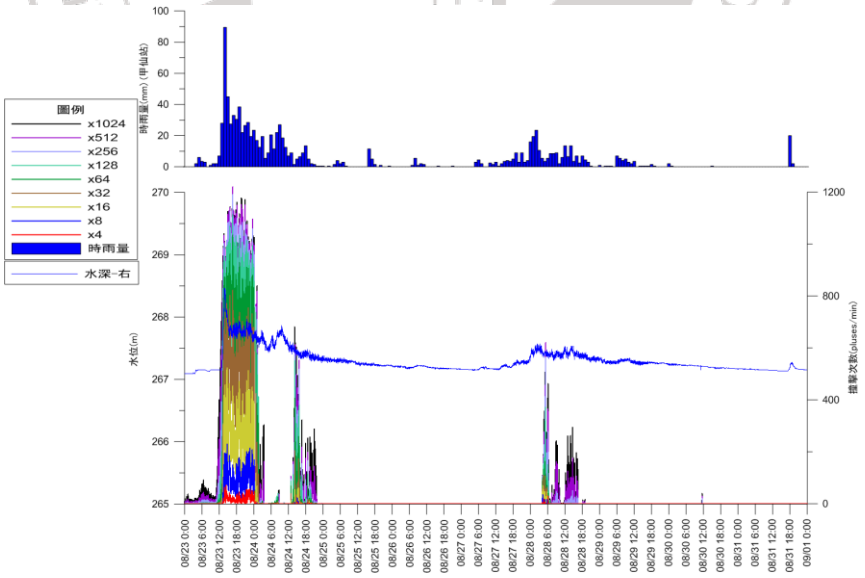


圖8-10 0823 熱帶低壓-水聲計撞擊次數及右岸水位計與時雨量紀錄

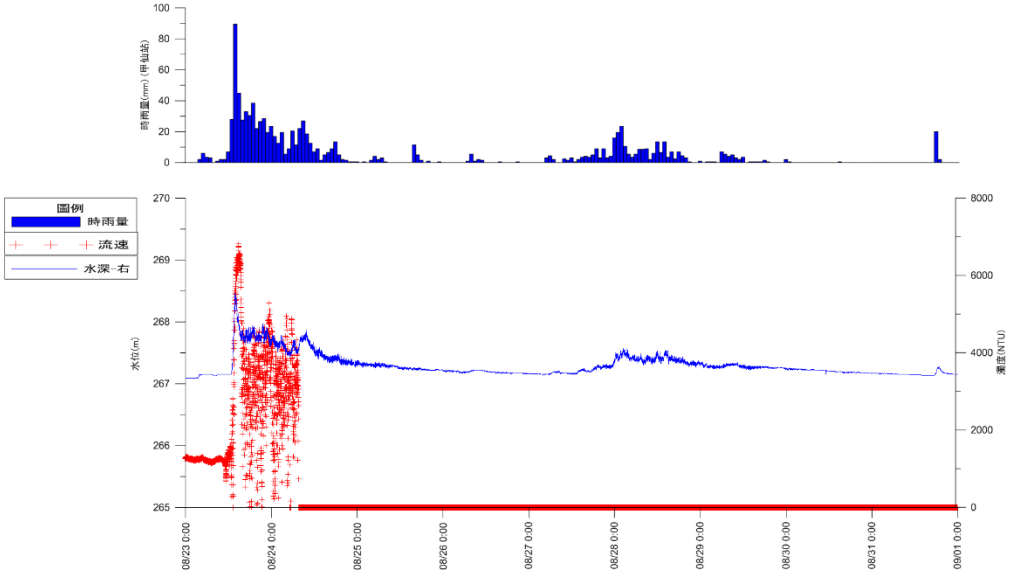


圖8-11 0823 熱帶低壓-底床流速計及右岸水位計與時雨量紀錄

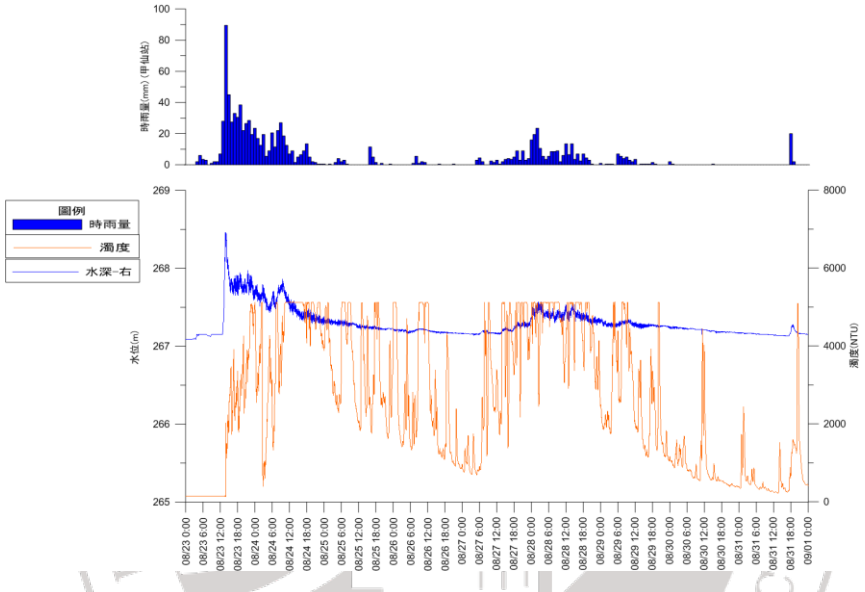


圖8-12 0823 熱帶低壓-濁度計及右岸水位計與時雨量紀錄

五、山竹颱風

山竹颱風期間相關監測記錄如圖 8-13～圖 8-14 所示，於甲仙站雨量紀錄總雨量為 3 mm（107/09/14 00:00 ～ 107/09/17 00:00），1 小時最大降雨強度 1.0 mm，水位最大變化值達 4.59 cm，因颱風路徑未登入臺灣，故帶來水氣較少，未能產生有效降雨，故此次事件相關水聲計撞擊次數無有效資料可供分析。

透過現場監測儀器相關紀錄以及氣象局雨量紀錄，可得知此次山竹颱風對甲仙地區影響較小，整體河川水位無明顯抬升，故無相關水聲計撞擊次數可供分析。

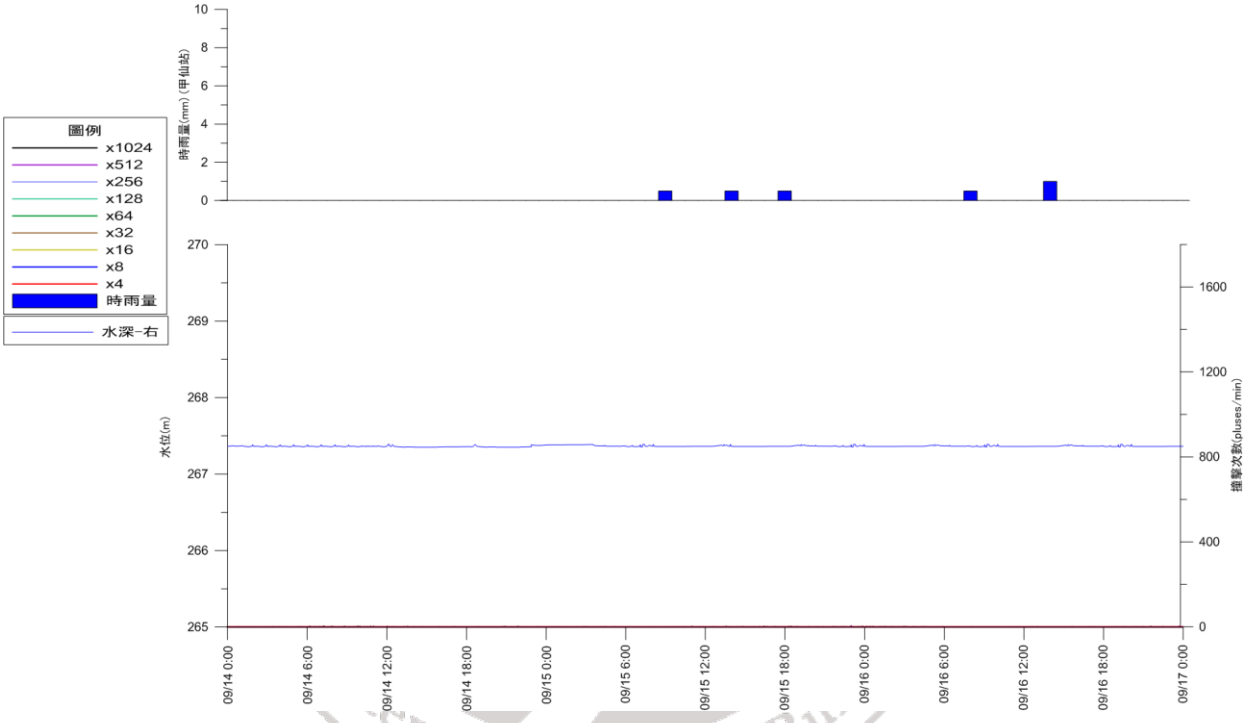


圖8-13 山竹颱風-水聲計撞擊次數及右岸水位計與時雨量紀錄

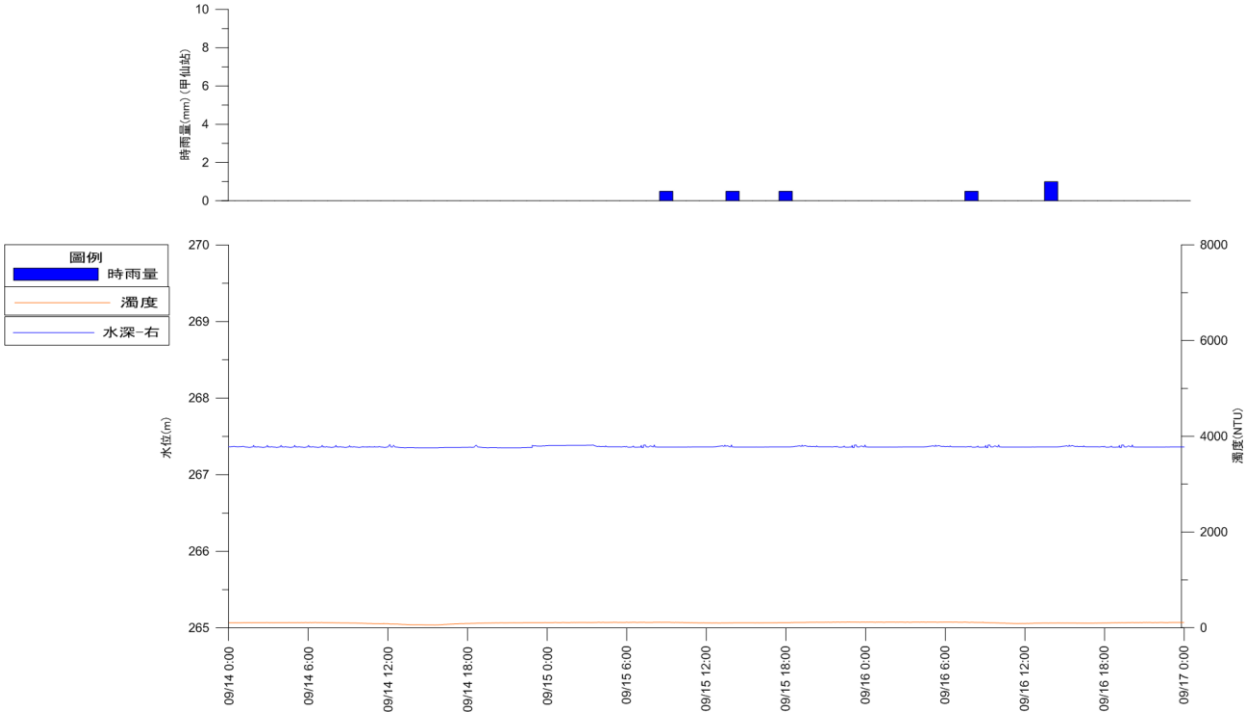


圖8-14 山竹颱風-濁度計及右岸水位計與時雨量紀錄

今年度至目前為止雖經歷 5 次事件，但因 0613 豪雨及山竹颱風降雨強度及總降雨量較小，實際上量測到的事件僅有 0619 豪雨、0702 豪雨與 0823 熱帶低壓，由今年度事件撞擊次數記錄中觀察到，放大倍率 1024 倍、512 倍、256 倍，因反應較為靈敏，容易達到量測上限，導致於事件中並未能與水深及流速變化有較即時的反應，而放大倍率 16 倍、8 倍、4 倍，因反應較為不靈敏，量測土砂粒徑需較大才能觸發反應，於事件過程中撞擊反應次數較少，亦不能與水深與流速變化有即時反應，故在今年度此次事件流量中進行土砂運輸量分析時，較適合利用於分析之放大倍率會是 128 倍、64 倍、32 倍等。

根據今年度降雨事件中發現，於監測示範站現場之土砂顆粒運移的水深條件至少需大於 20 cm，底床流速條件至少需大於 1.0 m/s 方能有明顯土砂顆粒撞擊反應。

# 第二節　室內試驗與現地試驗及現地監測成果分析

## 一、　水聲計量測成果與現有輸砂公式比較

監測成果應用前述現地試驗所得之參數如圖 8-15、表 8-2，建立輸砂量與撞擊次數之回歸關係，利用此關係進行初步推估底床載輸砂量，建立長期資料便可如日本監測成果(如圖 8-16)取得較完善之推估曲線關係，今年度更換管壁後 7.5 mm 水聲管，重新建立重量變化與撞擊次數之關係曲線，並挑選 64 倍放大倍率之迴歸關係(y = 1.856x)作為推估依據進行輸砂量估算。

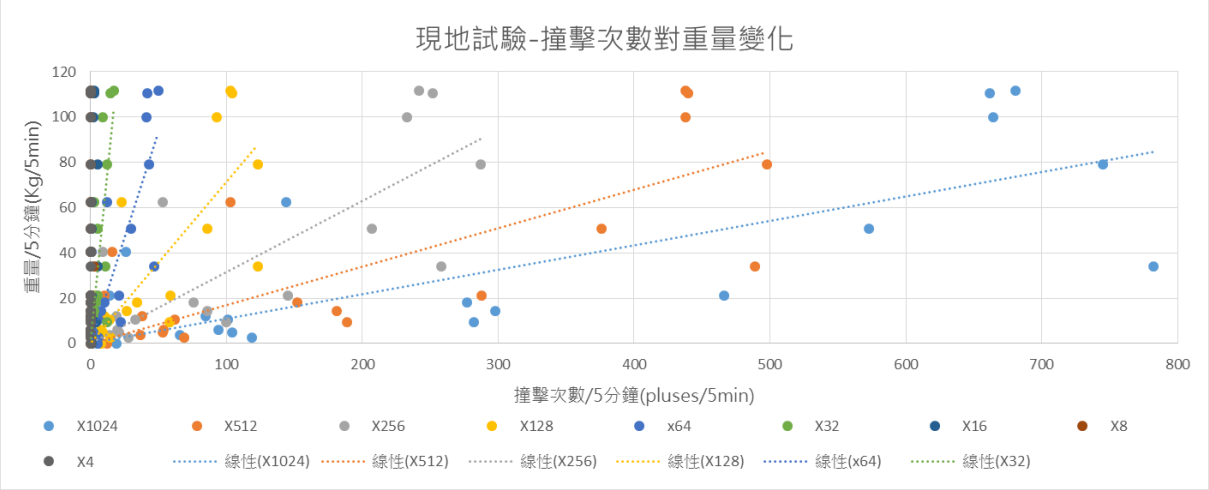


圖8-15 撞擊次數與輸砂量推算土砂量關係圖（107/11/03 試驗成果）

表8-2　各倍率趨勢線公式與相關性

| 放大倍率 | 趨勢線公式 | $R^2$ |
|---|---|---|
| X1024 | y = 0.1084x | 0.5361 |
| X512 | y = 0.1696x | 0.5686 |
| X256 | y = 0.314x | 0.5969 |
| X128 | y = 0.7115x | 0.5247 |
| X64 | y = 1.856x | 0.6322 |
| X32 | y = 6.0119x | 0.5369 |
| X16 | y = 17.275x | 0.0885 |

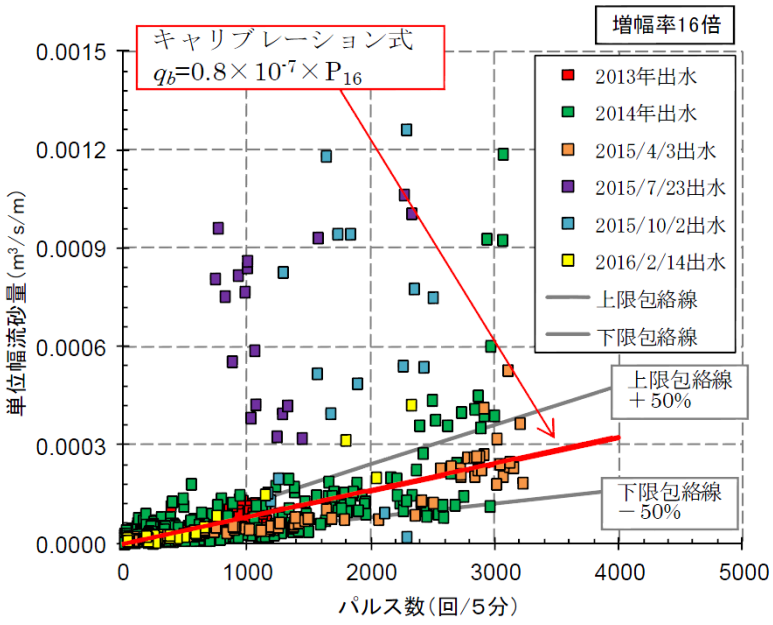


圖8-16 日本撞擊次數與輸砂量關係示意圖(日本工営株式會社，2016)

利用現地監測試驗所建立之關係式與現行底床載輸砂量推估方法（輸砂公式或懸浮載固定比例法等）進行比較，後續再另外與今年度設置之底床載直接式量測設備（囚砂箱）測量成果進行分析後，將得到河道底床載監測示範站之河道土砂輸送特性分析成果。

採用現有之輸砂公式利用 Meyer-Peter Müller 式，其公式如下所示，分析過程中使用參數如下表 8-3 所示，表中帶入 107 年 6 月 19 日 00:00 之水位量測值($h_0$)進行計算，帶入曼尼粗糙係數(n)、顆粒粗糙度($n_b$)以及平均粒徑($D_m$)作為底床載之土砂粒徑進行計算：

$$q_b = 8\left(\tau^{'}_{*} - \tau_{*c}\right)^{1.5}\sqrt{sgd^3}$$

$$\tau^{'}_{*} = \frac{{u^{'}_{*}}^2}{(\rho-1)gd} \qquad u^{'}_{*} = (n_b/n)^{3/4}u_{*} \qquad n_b = 0.0192d_{90}^{\frac{1}{6}}(d:cm)$$

$$\tau_{*} = \frac{{u_{*}}^2}{(\rho-1)gd} \qquad u_{*} = \sqrt{gRS}(m) \qquad h_0 = \left(\frac{nQ}{B\sqrt{S}}\right)^{\frac{3}{5}}(m)$$

式中：$q_b$ 為單寬流量，$\tau^{'}_{*}$為土砂顆粒所受剪應力，$\tau_{*c}$ 為臨界剪應力，s 為河道坡度，g 為重力加速度，d 為土砂粒徑，ρ 為土砂密度，$u^{'}_{*}$為顆粒速度，$n_b$ 為顆粒粗糙度，n 為曼寧(manning)粗糙度，$u_{*}$為底床流速，$\tau_{*}$為底床剪應力，R 為水力半徑，S 為濕周長，$h_0$ 為水深

表8-3 Meyer-Peter˙Müller 式計算參數與結果

| n | $n_b$ | 水深$H_0$ (m) | A ($m^2$) | R | $D_m$ (cm) | 底床摩擦速度 $u_*$ (m/s) | $\tau_*$ | $\tau_{*c}$ | $u'_*$ | $\tau'_*$ | $q_b$($m^2$/s) | $q_b$ (kg/min) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.035 | 0.0324 | 19.325 | 5.45 | 19.09 | 2.25 | 0.213 | 0.232 | 0.05 | 0.201 | 0.1255 | **0.0018** | **290.09** |

今年度共有 5 起降雨事件，分別為 0613 豪雨、0619 豪雨、0702 豪雨、0823 熱帶低壓以及山竹颱風，因 0613 豪雨降雨強度較低且水聲計因囚砂箱施工圍水，故未能收集到相關撞擊反應，而 0823 熱帶低壓因事件期間，流速計損毀，且事後發現水聲計線路受損，可能未紀錄到事件全程，另山竹颱風因未登陸台灣，且降雨較少，水聲計相關撞擊反應較少，故此三次事件暫不進行分析討論。

(一) 0619 豪雨事件

此次豪雨事件紀錄時間為 107/06/19 00:00～107/06/22 00:00，透過水聲計撞擊次數計算結果如圖 8-17，其中最大輸砂率為 4701.248 (kg/5min)，總輸砂量為 778315.456 (kg)，總體積為 293.704 ($m^3$)。

因輸砂量本身與流量相關，故整體趨勢與水位變化及降雨相似，與整場事件中水聲計 64 倍放大倍率持續有撞擊反應紀錄。

另使用 Meyer-Peter˙Müller 式進行輸砂量估算並進行比較，如圖 8-18 所示，透過 Meyer-Peter˙Müller 式計算結果中，最大單寬輸砂率為 16703.565 (kg/5min)，總輸砂量為 3839515.567 (kg)，總體積為 1448.874 ($m^3$)。

因 Meyer-Peter˙Müller 式主要變因為水深，故輸砂量與水位關係一致，於水退階段水聲計已較少撞擊反應時，Meyer-Peter˙Müller 式仍因水位而有輸砂量計算，整體來說 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量大於目前水聲計推估輸砂量。

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

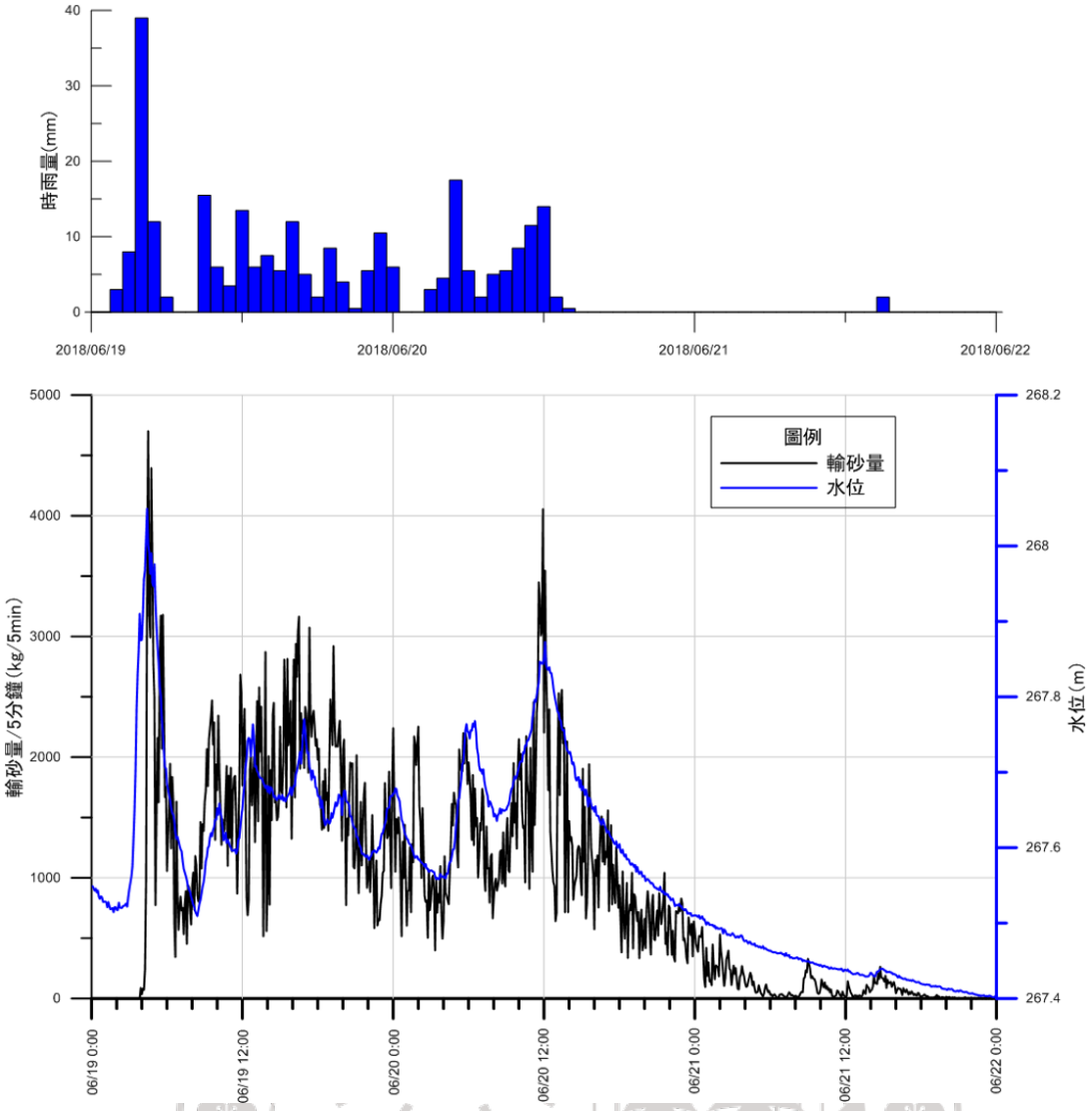


圖8-17 0619 豪雨-水聲計推估輸砂量與水位及時雨量關係

Soil & Water Conservation Bureau, COA

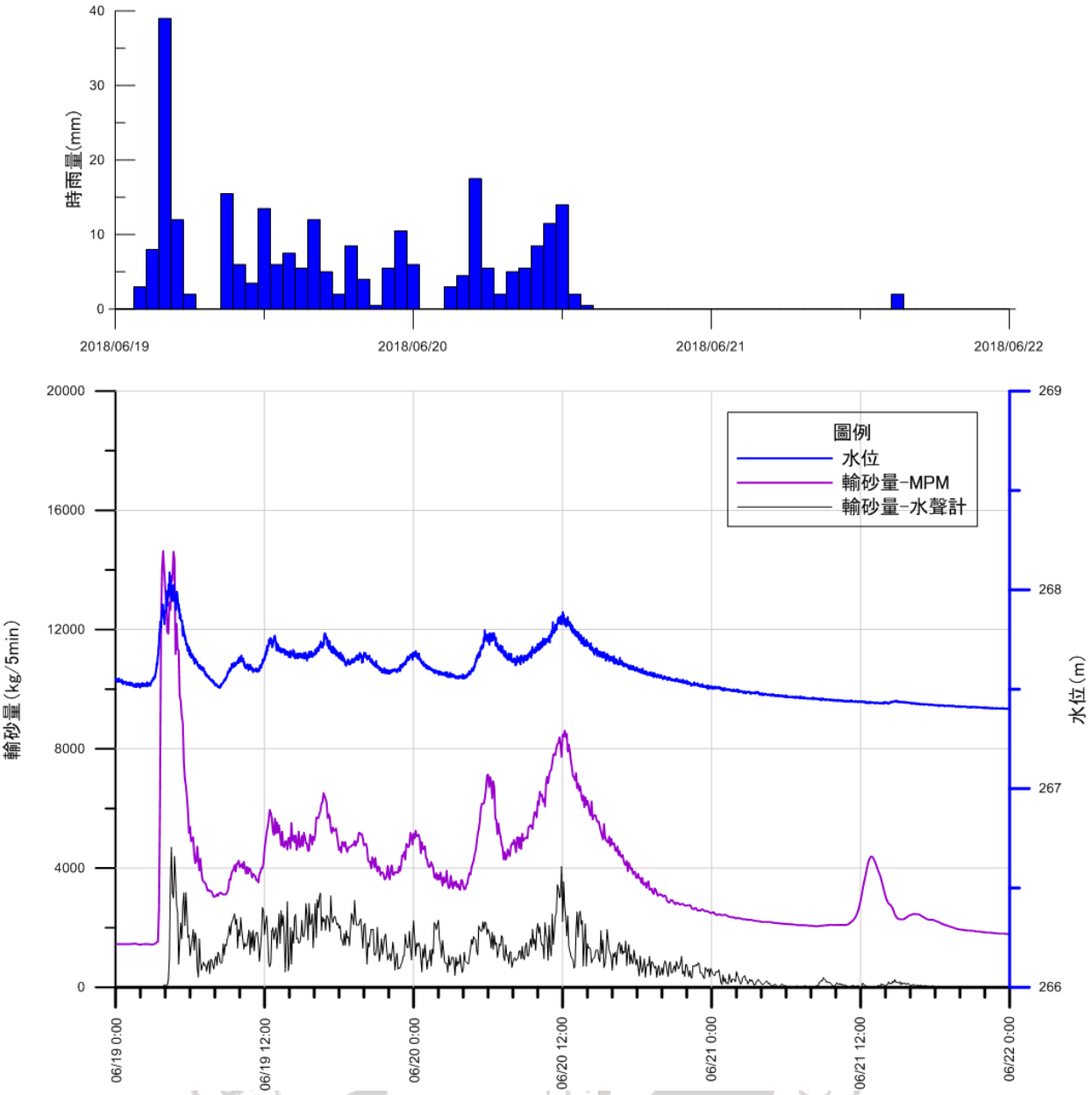


圖8-18 0619 豪雨-水聲計輸砂量與 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量比較

(二) 0702 豪雨事件

此次豪雨事件紀錄時間為 107/07/2 00:00 ~ 107/07/10 00:00，透過水聲計撞擊次數計算結果如圖 8-19，其中最大輸砂率為 5105.856 (kg/5min)，總輸砂量為 1083440 (kg)，總體積為 408.845 ($m^3$)。

此次事件過程中初期至中期，輸砂量變化大致與水位及雨量變化相符，至後期水聲計 64 倍放大倍率反應較少，所以未能與水位及雨量變化有相關變化，其原因可能為能觸發 64 倍放大倍率反應之粒徑減少所導致。

另使用 Meyer-Peter˙Müller 式進行輸砂量估算並進行比較，如圖 8-20 所

示，透過 Meyer-Peter˙Müller 式計算結果中，最大單寬輸砂率為 20809.998 (kg/5min)，總輸砂量為 7449061.666 (kg)，總體積為 2810.967 ($m^3$)。

Meyer-Peter˙Müller 式於事件末段仍有輸砂量計算，而水聲計已鮮少有撞擊反應，因仍有降雨造成水位抬升，可能為運移粒徑未觸發 64 倍放大倍率之水聲計反應，整體來說 Meyer-Peter˙Müller 式輸砂量大於目前水聲計推估輸砂量。

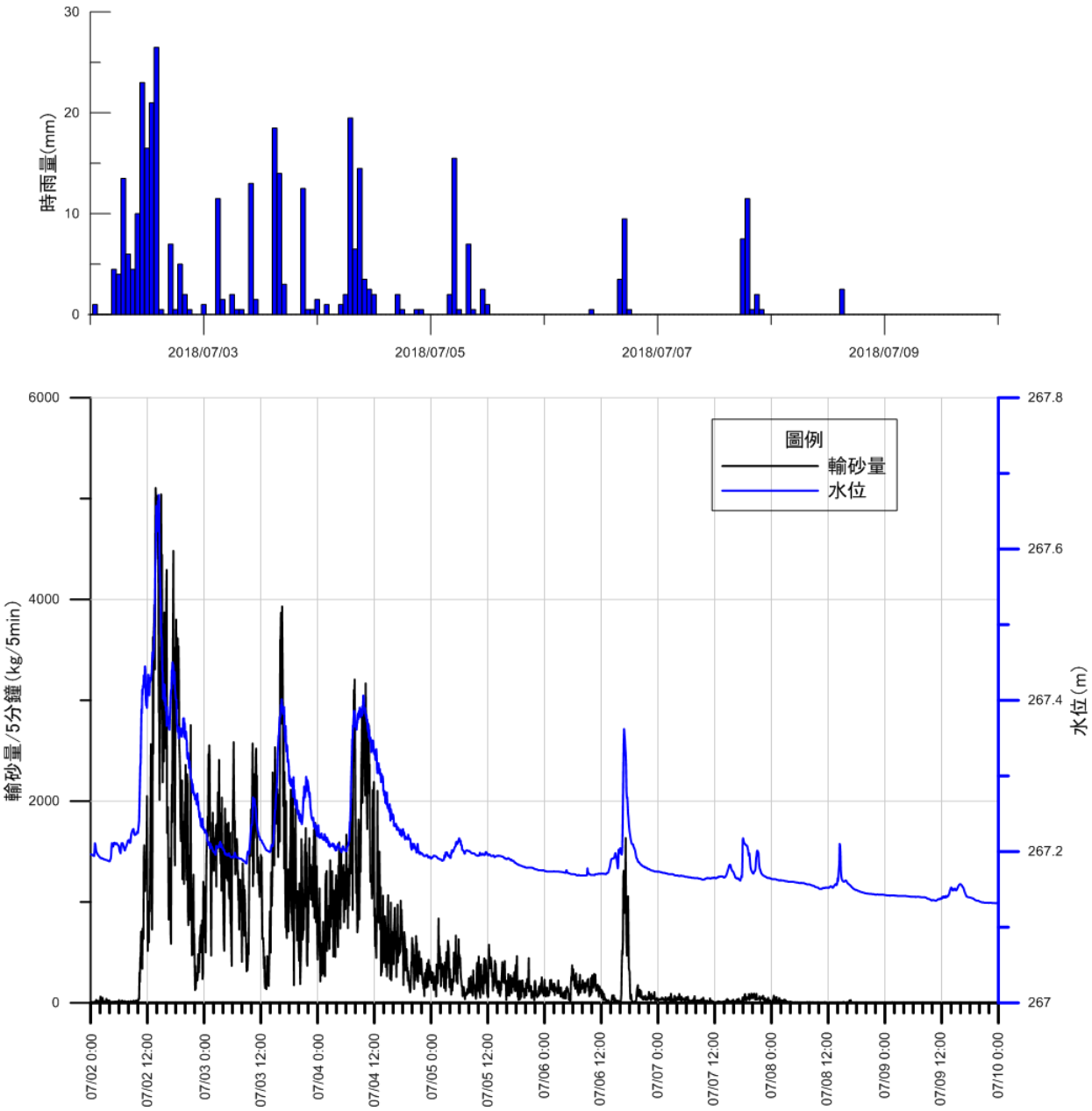


圖8-19 0702 豪雨-水聲計推估輸砂量與水位及時雨量關係

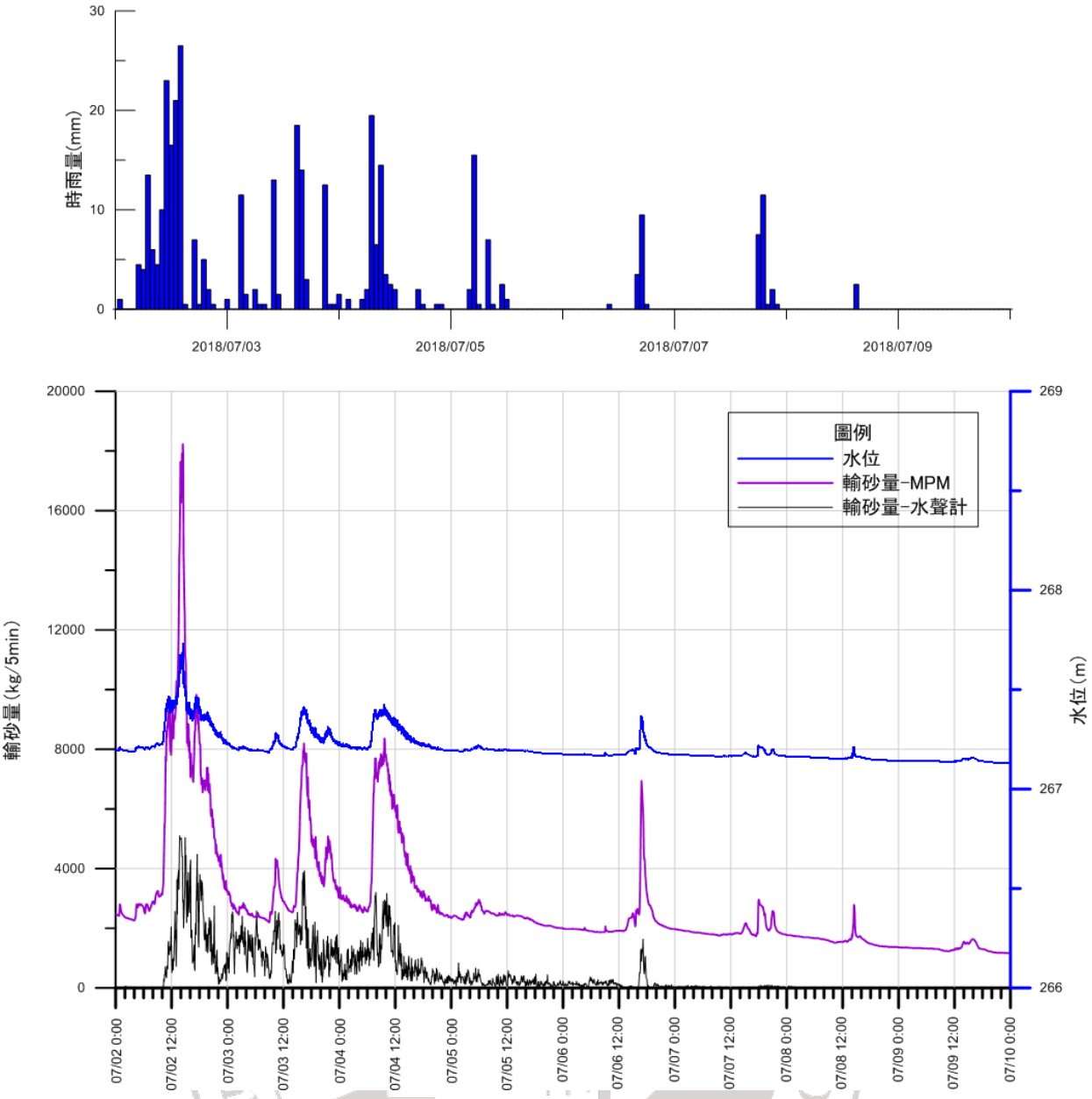


圖8-20 0702 豪雨-水聲計輸砂量與 Meyer-Peter Müller 式輸砂量比較

## 二、 水聲計量測與囚砂箱量測比較

因事件後囚砂箱內部淤滿，故事件收集總量等於囚砂箱容積，囚砂箱容積為 1 m * 2 m * 1.3 m = 2.6 $m^3$，土砂密度以 2.65 T/$m^3$ 估算，囚砂箱裝滿土砂重約為 6.89 T/$m^3$。

(一) 0619 豪雨事件

以現地監測所收集資料於 107/6/19 04:00 達到事件中最大 1 小時降雨量 39 mm/hr，於此階段水聲計有明顯反應時間點作為起算時間，計算 107/6/19 04:00～10/6/19 10:00 間土砂輸送量，並考慮水聲管長度 0.62 m，以及囚砂箱

開口 0.2 m 後，推估進入囚砂箱約為 6.832 噸，但因箱中底層多為細泥，故堆積開始時間可能需再往前，囚砂箱於事件初期便以被填滿，只觀測到事件歷程的 1/10。

(二) 0702 豪雨事件

以現地監測所收集資料於 107/07/02 14:00 達到事件中最大 1 小時降雨量 26.5 mm/hr，而水聲計於初期降雨便已有撞擊反應，計算 107/7/02 00:00～107/7/10 00:00 間土砂輸送量，於 107/07/02 11:10 推估土砂進入囚砂箱約為 6.952 噸已大於囚砂箱容量，故整體觀測時間只占事件時間 6%，表示此囚砂箱尺寸難以負荷河川土砂輸送量。

行政院農業委員會水土保持局 Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 第九章　河道底床載監測後續建議及應用

本計畫目前屬短期-第 3 年階段，如表 8-5，針對短期規劃主要目的為，針對底床載觀測成果品質檢核與管理評估階段，集水區河道土砂流出量觀測目的，在於提供底床載輸砂量測後續應用，故持續蒐集建立長期監測資料，並確保成果品質檢核，以提供後續之應用參考，如土砂收支管理模式精進、土砂出流管制與分配落實等。

本年度對監測成果與監測方法之適用性進行檢討（監測頻率、數據分析等），依據檢討結果，以及示範站長期監測計畫目標，針對後續監測及分析方法提出改善建議。

表9-1　監測計畫規劃表（前期成果）

| 時間 | | 底床載監測技術 |
|---|---|---|
| 短期 | 第 1 年～第 3 年 | 測站設置/既有成果彙整 |
| | | 室內外率定驗證/持續蒐集現地數據 |
| | | 持續蒐集現地數據<br>增設測站評估<br>監測技術檢討及改善建議 |
| 中期 | 第 4 年～第 5 年 | 建立輸砂量關係曲線<br>持續蒐集現地數據 |
| | | 輸砂量轉換模組研發 |
| 長期 | 第 6 年～第 10 年 | 推廣應用 |

# 第一節　監測技術應用限制與檢討

本計畫利用水聲計所得聲音訊號資料提出輸砂量估算方法有三，1.撞擊次數推估輸砂量、2.音壓動量關係推估輸砂量、3.不同倍率撞擊次數推估輸砂量，其估算方法與所需利用參數如下表。

方法一為日本早期使用之方法為應用撞擊次數與輸砂量之統計關係曲線推估輸砂量，累積較長期資料則可取得較佳之關係曲線，但其受區域土砂特性影響較大，並且在高流量條件下較難取得輸砂量，本計畫利用現地試驗及現地監測資料進行曲線推估，目前關係曲線以 64 倍放大倍率為推估依據如圖 9-1 所示，並利用囚砂箱搭配荷重計以取得較高流量條件下資料。

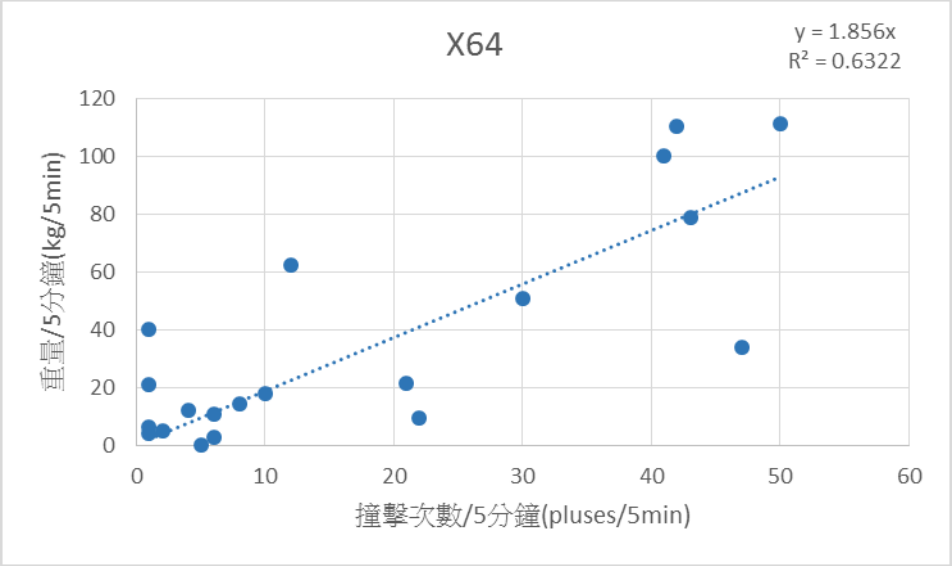


圖9-1 64 被放大倍率之撞擊次數與重量變化關係

方法二可推估顆粒重量、粒徑，但受音壓動量曲線線性區域限制，如圖 9-2 所示，為本計畫使用 7.5 毫米管厚水聲計之音壓動量關係，於實驗室利用記錄器以 1000Hz 紀錄頻率取得量測之音壓波形峰值，個別依音壓動量關係進行計算，即可取得單位時間內撞擊水聲計之估算土砂重量，並假設土砂顆粒為一圓球體，則可得到估算顆粒粒徑。

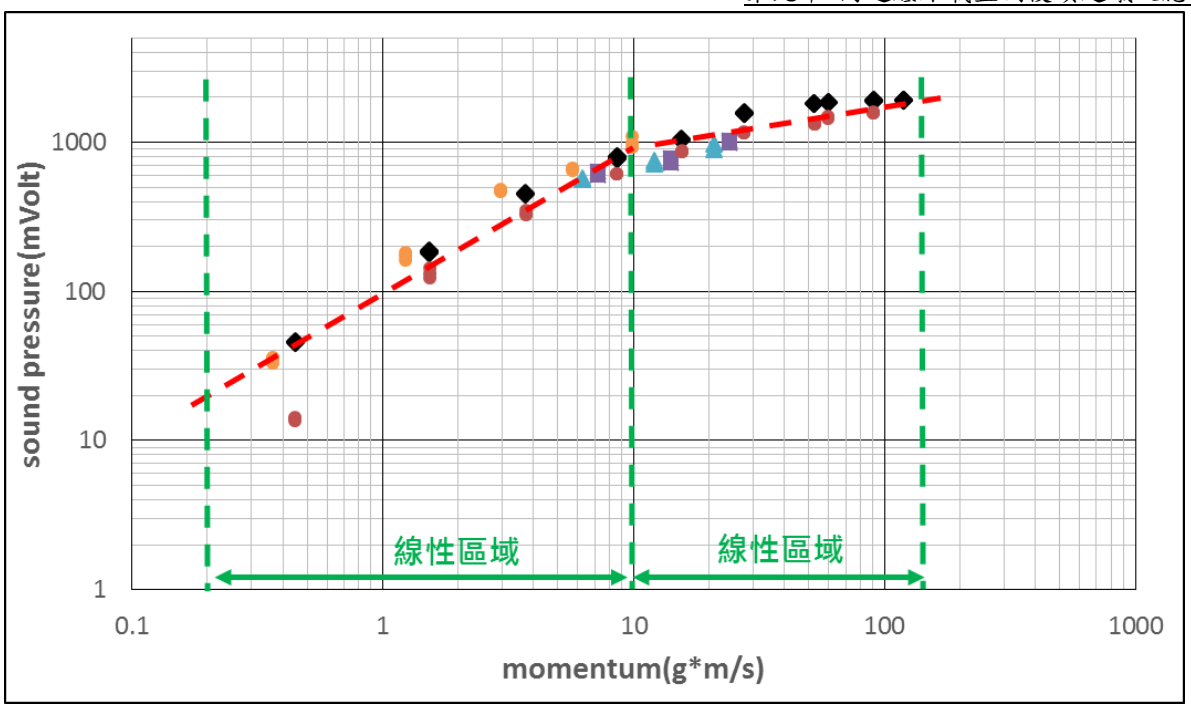


圖9-2 音壓動量曲線線性區域示意圖

方法三同樣利用音壓動量關係曲線，得到不同倍率最小觸發粒徑(重量)，如下表 9-2 所示，不同倍率之間撞擊次數差值，則視為兩最小觸發粒徑（重量）平均值，將所測得個別撞擊次數差值乘上觸發粒徑（重量）平均值，即可得知特定流況下單位時間通過個別顆粒粒徑（重量），觸發粒徑（重量）可於室內計算，現地記錄資料可快速代入進行計算估算重量，但超過最小觸發粒徑中的最大值，僅能得知撞擊顆粒超過最小觸發粒徑，未能進行估算。

表9-2 不同倍率觸發粒徑偵測率

| | CH.128 | CH.64 | CH.32 | CH.16 | CH.8 | CH.4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5mm | 6.0% | 3.6% | 2.2% | 0.4% | 0.0% | 0.0% |
| 10mm | 12.2% | 9.9% | 7.6% | 4.8% | 0.3% | 0.0% |
| 15mm | 14.0% | 11.4% | 10.3% | 8.4% | 4.9% | 0.3% |
| 20mm | 40.0% | 32.3% | 29.0% | 26.4% | 21.3% | 13.7% |

如同上述三種方法所需參數不一，其限制亦有差別，先針對水聲計本身設備限制進行說明，而後針對前述推估方法逐一說明，其限制及可能誤差來源，水聲計因其原理為分析顆粒撞擊水聲計產生之聲音訊號，故未撞擊到水聲計之顆粒則無法偵測，如層狀、躍移等狀況，意即為水聲計量測之撞擊有

低估之可能，另外水聲計所偵測撞擊訊號約為 20 毫秒（0.02 秒），兩次撞擊間隔小於 20 毫秒，則音壓波形重疊無法辨識為 2 次撞擊。

方法一為利用統計方法與實際輸砂量回歸曲線，水聲計因未撞擊低估次數已考量在內，無須利用修正係數再進行修正，限制主要來自於取得實際土砂底床載，利用人工於下游取砂、或利用採樣器等方法，於高流量條件下皆難以取得，且於高流量時期作業具危險性，利用囚砂坑可取得較大量之底床載土砂，但其缺點為於事件期間難以確認填滿時間，無確切時間則難以與水聲計資料進行率定比對，本計畫利用囚砂箱加裝荷重計，以取得箱體內重量變化歷線，並可判斷箱體是否已淤滿，另外實際量測因水聲計外露管子長度（60 公分），受到粒徑大小影響，撞擊次數有其上限值（受現地粒徑影響而不同），粒徑為 30 公分顆粒則同時間僅能通過 2 顆，粒徑為 1 公分則同時間可通過 60 顆，目前現地實測上限值約為每分鐘 1300~1400 撞擊次數間。

方法二為利用音壓動量關係，顆粒速度推估、量測影響甚大，並須另外利用偵測率修正顆粒數量，方可使推算結果接近實際結果，因須利用音壓波形資料，須利用每秒 1000 筆（1000Hz）以上頻率進行紀錄，方能取得較完整之波形紀錄，其所產生資料紀錄容量與現行 1 分鐘紀錄 1 筆資料，在同時間條件下紀錄筆數相差約 60000 倍，本計畫現地設備無法以如此高頻率進行紀錄，目前僅完成實驗室方法分析，另外其所能使用之粒徑範圍須位於音壓動量關係曲線線性區域，雖可辨認出撞擊音訊，但無法有效分析其粒徑、重量，如圖 9-3 所示，

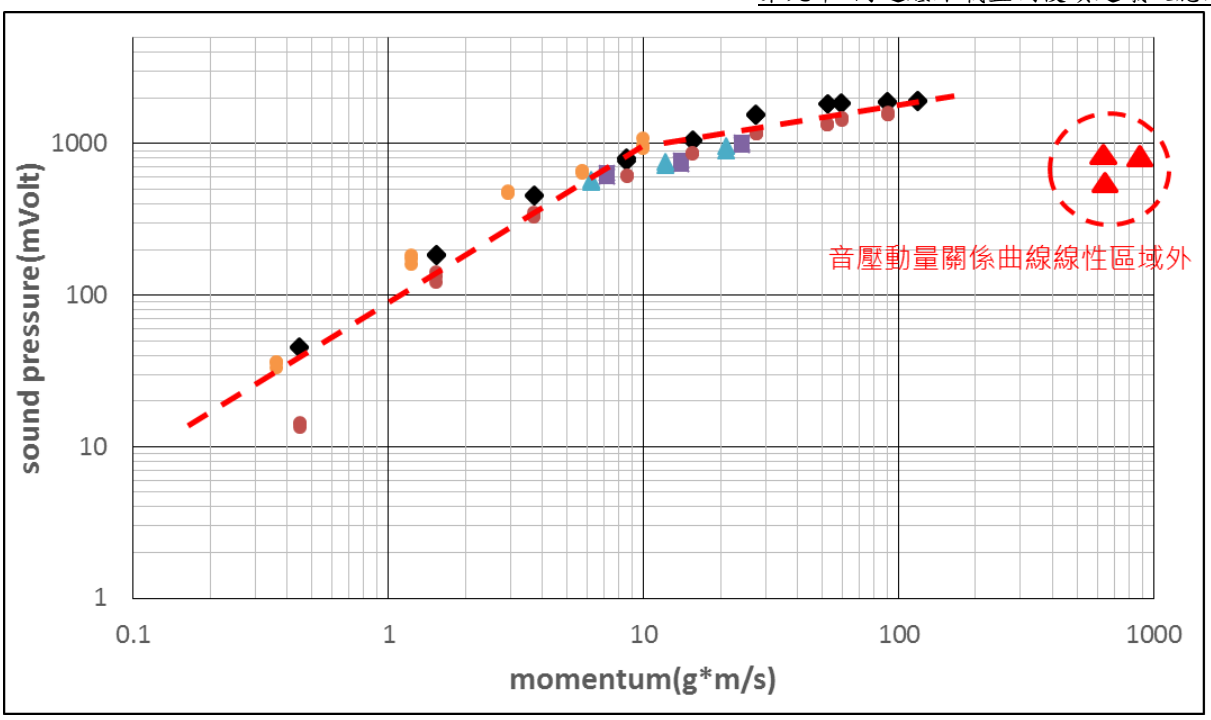


圖9-3 音壓動量關係曲線線性區域外示意圖

輸砂量推估方法相關比較如表 9-3 所示，方法三與方法二同樣計算個別顆粒重量、粒徑，故須針對偵測率進行修正，另外利用音壓動量曲線進行估算，最低倍率之最小觸發粒徑，即為最小觸發粒徑所能辨識之最大粒徑，超過此範圍，雖可辨認出撞擊次數，但無法有效分析其粒徑、重量。

表9-3　輸砂量推估方法比較

| 方法 | 輸砂量推估方法與所需參數 | | | 優點/限制 | 備註 |
|---|---|---|---|---|---|
| **1.撞擊次數推估輸砂量** | 不同倍率撞擊次數<br>（水聲計） | 底床載輸砂量<br>（人工量測、荷重計） | | 快速推算輸砂量重量、無須修正係數、長期資料獲得可靠關係 | 現地透過直接式量測設備加裝荷重計以取得較多筆紀錄資料 |
| | 輸砂量 = 撞擊次數 × $\mathcal{F}$（撞擊次數, 輸砂量） | | | 須累積資料挑選合適倍率、高流量底床載直接獲取困難 | |
| **2.音壓動量關係推估輸砂量** | 音壓波形峰值<br>（水聲計） | 音壓-動量關係曲線<br>（水聲計） | 顆粒速度<br>（公式、流速計） | 可推算輸砂量重量、粒徑、受區域輸砂特性影響小 | 僅實驗室分析，現地使用須更新紀錄器 |
| | 輸砂量 $= \frac{\Delta\ 估算土砂重}{\Delta\ 單位時間}$<br>估算土砂重 = 音壓峰值 × $\mathcal{F}$（音壓, 動量）÷ 顆粒速度 | | | 紀錄頻率較高、須修正係數、超過音壓-動量關係線性區域則無法準確估算 | |
| **3.不同倍率撞擊次數推估輸砂量** | 撞擊次數<br>（水聲計） | 音壓-動量關係曲線<br>（水聲計） | | 可推算輸砂量重量、粒徑 | 僅實驗室分析，現地使用無須更新紀錄器 |
| | 輸砂量 = 不同撞擊次數 × 最小觸發粒徑 | | | 超過最大最小觸發粒徑則無法估算粒徑 | |

## 第二節　監測站設置評估

後續欲持續進行此項監測儀器之應用推廣，則需考慮裝設於其他站點，而日本將管式水聲計應用於全日本各地 21 條河川 60 處地點（詳見圖 9-4），裝設地點集水區面積最小為宇治川觀測所（3.0 $km^2$），最大為越戶橋觀測所（913.0 $km^2$），裝設河川坡度最小為御鍋堰堤觀測所（0.17°），最大為松川地區觀測所（12.80°），由此可知此儀器可適用範圍相當廣泛，而站點挑選除可慮設站環境調見外，另考量到建站成本，則可由目前水土保持局自有 26 處土砂觀測站中進行挑選（詳見附錄四），可考慮以這些觀測站進行後續推廣管式水聲計的設置地點。

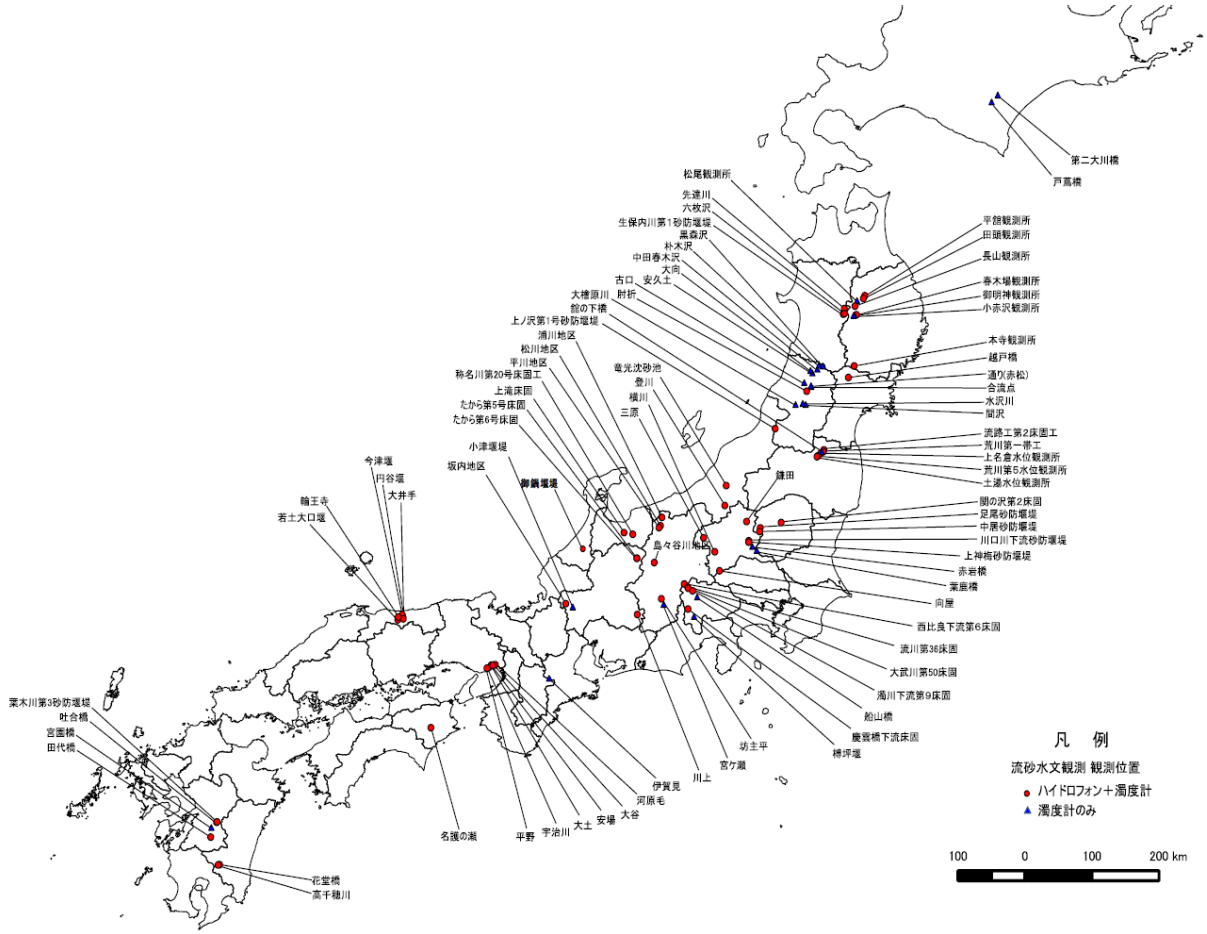


圖9-4 日本土砂監測站位置分佈圖

集水區河道土砂流出量觀測系統設置及研究(2/2)

考量日本現地裝設條件之集水區面積範圍(3.0 ～ 913.0 $km^2$)以及坡度範圍(0.17$^0$ ～ 12.8$^0$)，配合水土保持局自有 26 處土砂觀測站，進行集水區面積、河道土砂粒徑、河床構造物之有無、水位量測之有無、流速量測之有無以及是否鄰近治理界點等條件，進行評估，評估結果如表 9-4 所示，目前篩選出五站較為適宜站點，分別為蘇樂、下田埔、九份二山、南豐、華山，其中蘇樂、下田埔尚未有現地粒徑資料還需確認是否適合裝設儀器，九份二山缺少泥砂監測及未鄰近治理界點，南豐、華山為缺少流速量測與泥砂量測資料。

除上述條件外由本計畫示範站經驗，1.長直河道，減少彎道水位超高影響 2.橫向人工構造物可供設備安裝，壩體與下游具有一定落差，使水流與壩體成臨界水深，可減少土砂淤積覆蓋影響者佳 3.有橋樑、腹地可供人工、機械量測、施工者佳。

表9-4 水保局現有土砂測站評估

| 項次 | 站名 | 集水區面積(>300ha) | 材料粒徑(<12") | 河床構造物 | 水位量測 | 流速量測 | 泥沙量測 | 鄰近治理界點(水利、林務) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 大粗坑 | | | V | | | | |
| **2** | **蘇樂** | **V** | **-** | **V** | **V** | **V** | **V** | **V** |
| 3 | 玉峰 | V | - | | | V | | |
| **4** | **下田埔** | **V** | **-** | **V** | **V** | **V** | **V** | **V** |
| 5 | 白布帆 | | V | | V | | | V |
| 6 | 松鶴 | V | V | V | | | | V |
| 7 | 上安 | V | | | V | | | V |
| 8 | 郡坑 | | | | V | | | V |
| 9 | 神木 | V | V | | | V | | V |
| **10** | **九份二山** | **V** | **V** | **V** | **V** | **V** | | |
| 11 | 豐丘 | | | V | V | | | |
| **12** | **南豐** | **V** | **V** | **V** | **V** | | | **V** |
| **13** | **華山** | **V** | **V** | **V** | **V** | | | **V** |
| 14 | 坪頂 | V | - | | | | | |
| 15 | 豐山 | V | | | | | | V |
| 16 | 羌黃坑 | | - | V | V | V | | V |
| 17 | 集來 | V | - | V | V | | | V |
| 18 | 來義 | | | | V | | | |
| 19 | 大興 | V | | V | | | | V |
| 20 | 和中 | V | | | | | | |
| 21 | 鳳義坑 | V | | V | | | | |
| 22 | 射馬干 | V | V | V | | | | |
| 23 | 大鳥 | | V | V | V | | | |
| 24 | 寒溪 | V | - | | V | | | V |
| 25 | 火炎山 | V | - | | | | | |

## 第三節　後續應用與建議

管式水聲計執行至目前已達第三年，現階段已能獲取事件過程中的土砂運移連續撞擊紀錄，並可進行土砂運移量推估計算，雖推估式未臻完善，但已是一大進步，過去依據水位、流速、濁度等數據進行推估，存在誤差及正確性未能確認，現透過此管式水聲計取得較為可信之數據進行推估計算，後續可配合其他推估方式進行比較檢核，來取得較為可信之土砂運移量，作為土砂治理等相關政策之依據。

目前日本管式水聲計主要發展方向分別為水聲計耐受性提昇、輸砂量斷面分佈，聲音訊號處理資料，水聲計本身鋼管厚度提昇或使用平板式水聲計，使其於設置環境中，具有較好之抗性，減低土砂顆粒撞擊儀器受損之風險；現地監測發現底床載為非均勻，水平方向利用多組水聲計進行量測，取得較好之監測資料外，垂直方向利用水聲計量測底床載垂直方向變化，兩種方式皆為修正推估土砂量；另外過去因聲音訊號資料量龐大，現地監測多儲存為訊號處理後之資訊，如撞擊次數，而現在正嘗試於現地直接紀錄原始聲音訊號，由於紀錄頻率須達 50000 赫茲(Hz)以上，記錄器容量、處理能力，都遠較一般水聲計設備要求要高上許多，所需電力較大，多為直接採用市電方能維持，故僅為少數幾處進行實驗性質測試，多數仍採用紀錄處理後數值之方式紀錄，而藉由處理原始訊號經驗，嘗試量取事件期間原始聲音訊號，並考量現地維護可行性、適用性等，目前逐步提出適用於現地紀錄之可行方法，如紀錄音壓平均值等方式。

日本目前現地監測執行成果主要將管式水聲計的監測記錄，透過與囚砂箱所建立之關係式（如圖 9-1）進行土砂運移量計算，另透過水聲計紀錄音響波型，利用音壓波型進行粒徑推算，並透過囚砂箱與水聲計推估粒徑結果進行比較分析（如圖 9-5、圖 9-6），其中因水聲計其量測限制為 3～4 mm 以上之土砂顆粒，故進行比較分析時需將囚砂箱內 2 mm 以下之土砂顆粒排除，

推估結果中水聲計所得粒徑範圍較為集中，其原因可能受限於儀器的量測範圍所致。

另為了瞭解河道土砂輸送特性，針對河川流量與輸砂量進行比較，並利用現有土砂運移推估式，與水聲計推估結果進行比較（如圖 9-7），得出結果皆小於目前常用土砂輸送量計算式，代表過去可能皆高估土砂輸送量。

底床流速計於 106、107 年度皆因土砂顆粒運移導致儀器表面磨損，於去年度雖有部分磨損，但未損壞，今年度 0823 熱帶低壓後儀器毀壞，考量目前情形建議後續改採為非接觸式流速計(如雷達波水位計)，以減少受到磨損毀壞之可能。

今年度於現地加設囚砂箱，因場地限制僅能裝置於水面以下，未來挑選點為可找尋有明顯段差之場址，較便於加裝囚砂箱體，以及後續相關維護與清理。

如能確認河川之土砂輸送特性，則後續可應用於類似流域（集水區面積、平均年降雨量、河床坡度、粒徑分布、岩性等條件），進行流域特性的土砂生產、輸送等評估，或是應用於需要了解河川土砂運輸總量的區域進行相關土砂管理規劃。

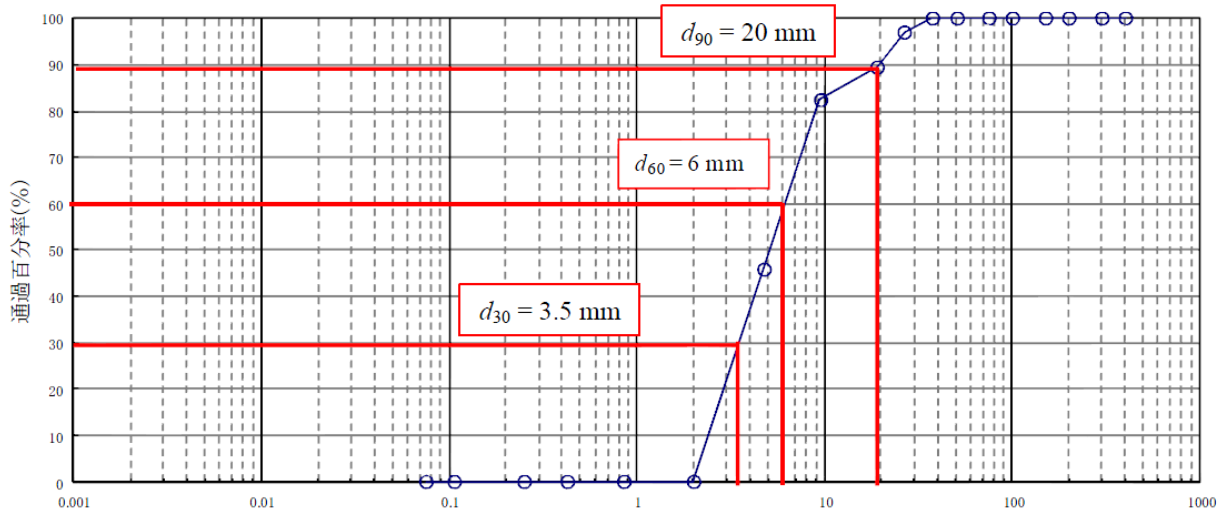


圖9-5 常願寺川 2015 年 4 月 3 日事件囚砂箱內土砂粒徑分布曲線（日本工營株式會社，2016）

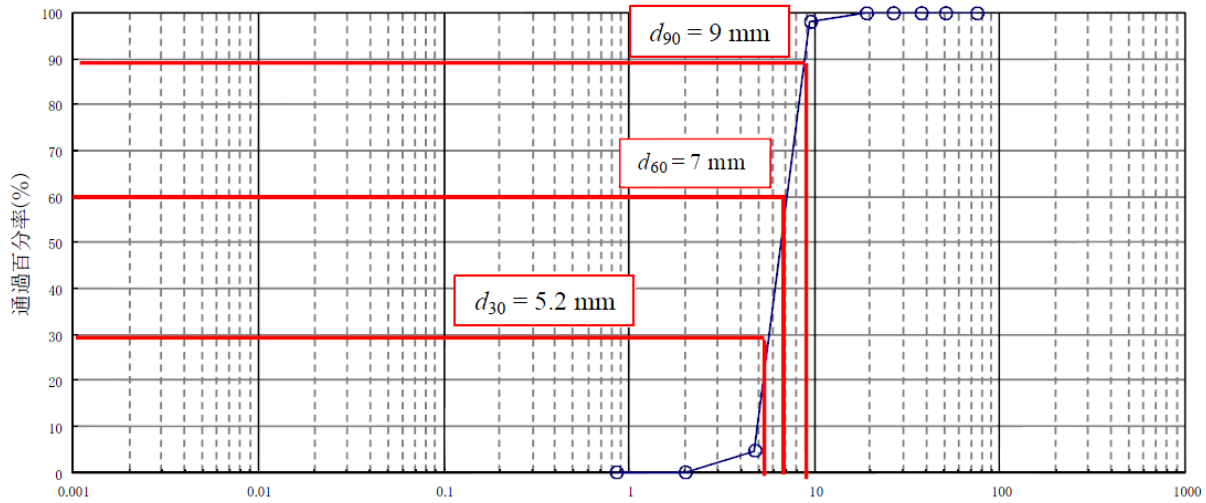


圖9-6 常願寺川 2015 年 4 月 3 日事件水聲計推估土砂粒徑分布曲線（日本工營株式會社，2016）

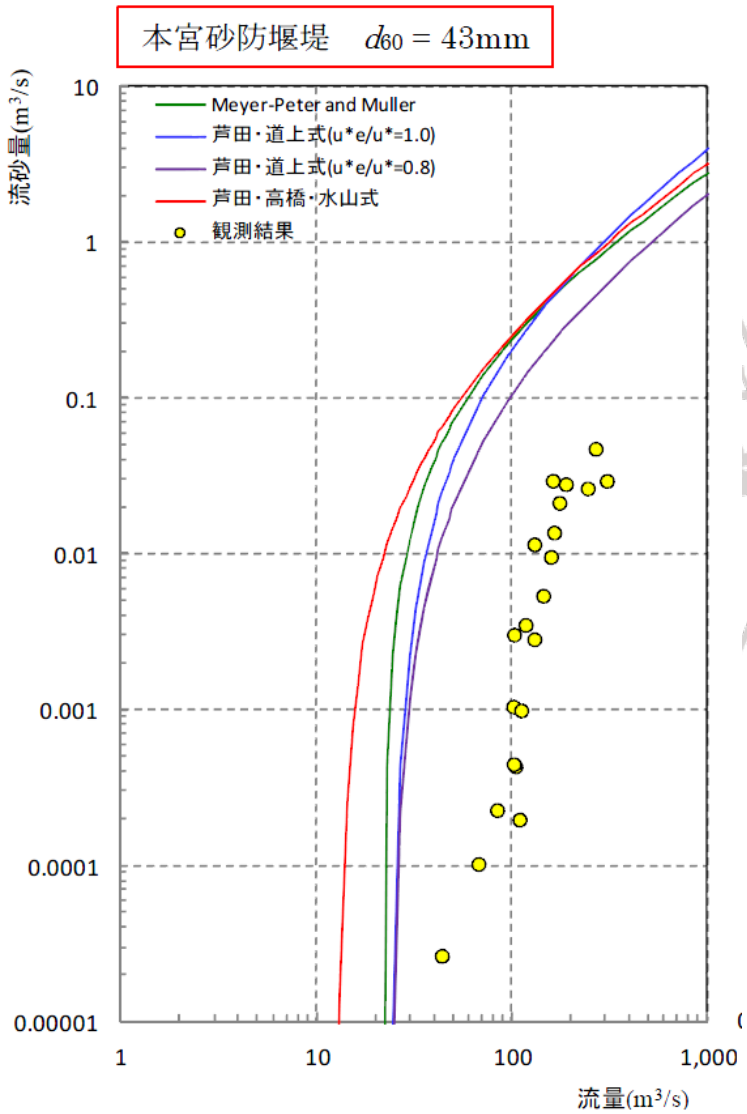


圖9-7 常願寺川本宮砂防堰堤流量與輸砂量比較（日本工營株式會社，2016）

# 第十章　結論與建議

今年度共遭遇 5 場降雨事件，其中降雨強度足以引發水聲計撞擊反應之事件共 3 場，分別為 0619 豪雨、0702 豪雨以及 0823 熱帶低壓，今年度最大降雨事件為 0823 熱帶低壓，總降雨量達 1000.5 mm，事件過程中造成監測儀器損壞，未來將針對此狀況進行防範與改善。

今年度於現地加裝囚砂箱及自動秤重系統，可於現地收集事件過程收集相關土砂運移樣本，未來將配合水聲計於事件中之監測資料，以及自動秤重系統之紀錄進行相關土砂運移分析，用以完善水聲計推估關係式。

## 第一節　結論

一、　今年度因 3.0 mm 厚水聲管於 106 年度事件中損壞，而更換為 7.5 mm 厚水聲管，管徑厚度增厚增加水聲管耐受度，於今年度事件後檢測中發現 7.5 mm 厚水聲管未出現凹損現象，表示 7.5 mm 厚水聲管足以承受現場土砂顆粒之撞擊，水聲管耐受度獲得改善，較無受損凹陷之風險。

二、　現地水位計與監測儀器傳輸線路保護管，在今年度於對岸加設水位計以及更換傳輸線路保護鋼管後，皆得到改善，原受主流深槽擺盪影響之右岸水位計，可透過左岸水位計之觀測數值做紀錄，而傳輸線路保護鋼管由鍍鋅鋼管更換為不鏽鋼管後，經過今年度事件目前未出現鏽蝕狀況。

三、　現地水聲管增加厚度，雖保持內徑大小不變，對圓周向音頻分析較無影響，但整體對於土砂顆粒撞擊之敏感度有下降趨勢，透過音壓動量關係發現同樣大小之顆粒，需以較大之速度方能被感測到。

四、　今年度透過現地囚砂箱與自動秤重系統進行現地試驗，因不再需要人員於水聲計下游進行囚砂，收集通過水聲計之土砂顆粒，故試驗供砂量與試驗流況條件可調整至較過去較高供砂量與高流量，並獲得迴歸關係較佳

之水聲計土砂流出量推估式（64 倍放大倍率，土砂流出量 = 1.856×撞擊次數）。

五、 今年度於室內進行音壓與動量關係之推估方式探討，並進行推估量與實際量對無因次剪應力之比較來進行推估量修正，測試結果確認可透過此方式進行推估量修正，修正後可獲得較正確之土砂流出量。

六、 今年度完整收錄之事件為 0619 豪雨與 0702 豪雨，透過水聲計土砂流出量推估式進行事件之水聲計土砂流出量推估，並與 Meyer-Peter˙Müller 式所計算之土砂流出量進行比較，發現 Meyer-Peter˙Müller 式其土砂流出推估量大於水聲計土砂流出推估量約 4 ～ 7 倍，由結果認為部分差異來自降水階段，水聲計已無撞擊反應，而因水位尚未消退，故 Meyer-Peter˙Müller 式計算中仍有土砂流出，造成 Meyer-Peter˙Müller 式土砂流出推估量大於水聲計土砂流出推估量。

## 第二節 建議

一、 今年度利用 7.5 mm 厚水聲管進行觀測，於強降雨事件後未見明顯凹損，且今年度另加設囚砂箱與自動秤重系統進行觀測，為增加相關監測數據，建議此監測站持續進行觀測，收錄更多強降雨事件資料，用以完善土砂流出量推估式，以供未來土砂管理參考。

二、 今年度 0823 熱帶低壓事件中，因強降雨影響，造成底床土砂運移劇烈，磨損現地固床工與監測儀器，令底床流速計磨損毀壞，106 年度中底床流速計雖有磨損但未達損壞之情況，故根據 106 年與 107 年之受損情形，建議改裝設非接觸式流速計，以避免再次損壞影響觀測。

三、 囚砂箱體現為常時開放收集土砂，建議可增設控制囚砂箱開口閉合之開關，可於適當時間點開啟與關閉囚砂箱體，確保收集土砂之代表性與準確性。

四、 音壓與動量關係之推估方式，透過推估量與實際量對無因次剪應力之比較進行推估量修正，今年度僅進行兩組流況試驗，後續可增加多組流況確認其修正關係。

五、 透過評估水保局現有土砂觀測站之集水區面積、河道土砂粒徑、河床構造物之有無、水位量測之有無、流速量測之有無以及是否鄰近治理界點等條件，評估篩選出五站較為適宜後續水聲計推廣裝設之站點，分別為蘇樂、下田埔、九份二山、南豐、華山，後續可由這五處進行詳細調查評估。

六、 未來欲於現地應用音壓動量關係進行推估，必須利用高紀錄頻率（50000 Hz 以上）之記錄器進行收錄相關音壓，方可取得準確之撞擊音訊峰值，現受限於現地記錄器無法收集完整音訊紀錄，未來可嘗試收集事件中之音訊進行分析試算。


行政院農業委員會水土保持局
Soil & Water Conservation Bureau, COA

# 參考文獻


1. 蘇重光，謝蒼明，雙乘數式河床推移載採樣器之改良研究，1986。
2. 經濟部水利署，台灣地區小型河川底床推移載泥砂傳輸量測儀器計畫－以筏子溪為例，2007。
3. 刘德春，川江推移质泥沙观测技术研究，2012。
4. 国土技術政策総合研究所，近年の山地河川における流砂水文観測，2016。
5. 内田太郎，吉村暢也等人，ハイドロフォンの衝突率に関する実験，砂防学会誌，Vol.67，No.5，2015，pp.24-29。
6. 日本工営株式会社，常願寺川土砂移動モニタリング調査業務，2016。
7. I.Reid, J.T. Layman, L.E. Frostick, The Continuous Measurement Of Bedload Discharge, 1980, Journal of Hydraulic Research 18, No.3,pp.243-249
8. Leichtweiß institute, Geschiebemessungen, 1992
9. Dipartimento di Scienze della Terra Polo Scientifico e Tecnologico, course on fluvial dynamics, Italy.
10. Bergman, N., Laronne1, J. B. and Reid, I., Benefits of design modifications to the Birkbeck bedload sampler illustrated by flash-floods in an ephemeral gravel-bed channel, Published online 1 November 2006 in Wiley InterScience DOI: 10.1002/esp. 1453.
11. Kristin Bunte, Kurt W. Swingle, Steven R. Abt, Guidelines for Using Bedload Traps inCoarse-Bedded Mountain Streams，United States Department of Agriculture, 2007.
12. WD Erskine, MJ Saynor, et al., Bedload transport, hydrology and river hydraulics in the Ngarradj Creek catchment, Jabiluka, Northern Territory, Australia, 2011
13. Atsushi OKAMOTO, Taro UCHIDA, et al.,Possibility of early warning for large-scale landslides using hydrological and sediment transport observations in mountain rivers, Italian Journal of Engineering Geology and Environment- Book Series （6）, 2013, pp.361-369.

14. Taro UCHIDA, Atsushi OKAMOTO, et al., Hydrophone observations of bedload transport in mountainous rivers of Japan, Advances in River Sediment Research, 2013, pp.1749-1756.
15. Takahisa Mizuyama, Ryosuke Hirasawa, et al., Sediment monitoring with a hydrophone in mountain torrents, 2011, International Journal of Erosion Control Engineering Vol.4, No.2, pp.43-47.
16. Takahiro ITOH, Ken GOTOH, et al., Experimental Studies for Monitoring of Bedload using Various Sensors, 2014.
17. Ken GOTO, Takahiro ITOH, et al., Experimental and theoretical tools for estimating bedload transport using a Japanese pipe hydrophone, International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 7, No. 4, 2014, pp. 101-110.
18. Daizo TSUTSUMI, Yutaka HIGASHI, et al., Bedload monitoring in a mountain stream : Method for improving the accuracy of the calibration relationship between acoustic pulses and bedload discharge, 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, 2017.