



行政院農業委員會水土保持局

【系列固床工間距對泥砂沖淤之數值模擬探討】

成果報告書



計畫主持人

黃宏斌教授

國立臺灣大學

中華民國 110 年 12 月

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	IX
第一章 前言.....	1
第一節 緣起與目的	1
第二節 工作項目與內容	2
第三節 預期成果	3
第二章 固床工水理機制相關文獻與資料收集	4
第一節 固床工水理特性	5
第二節 沖刷回歸參數因子	8
第三節 數值模擬分析	13
第四節 前期計畫研究成果	16
第三章 現地資料蒐集	31
第一節 現地工程資料蒐集	31
第二節 集水區水文分析	39
第四章 數值模擬輸砂性質	52
第一節 RiverFlow 2D 模式介紹	52
第二節 模擬參數設定	67
第三節 敏感度分析	90
第四節 輸砂公式分析	105
第五節 資料彙整與結論	123
第五章 工作進度與組織	153
參考文獻.....	158

附錄一、期初審查意見與回覆	163
附錄二、期中審查意見與回覆	167
附錄三、期末審查意見與回覆	170
附錄四、空拍資料精度分析	171

圖目錄

圖 2-1 綜合沖刷坑深度無因次模式圖	11
圖 2-2 帶工下游淘刷坑幾何形狀與水理參數關係	12
圖 2-3 各型式固床工之流量與渠道中心沖刷坑深之關係	18
圖 2-4 各型式固床工之流量與兩岸沖刷坑深之關係	18
圖 2-5 上拱型固床工固定底部之應力分布情形	22
圖 2-6 上拱型固床工無固定底部之應力分布情形	22
圖 2-7 上拱型固床工固定底部之力矩分布情形	23
圖 2-8 上拱型固床工無固定底部之力矩分布情形	23
圖 2-9 下拱型流線分布情形俯視圖	24
圖 2-10 上拱型流線分布情形俯視圖	24
圖 2-11 SRH2D 上拱型固床工($Q=73.59\text{cms}$, 高=1.5m)之沖淤分布 .	25
圖 2-12 SRH2D 下拱型固床工($Q=73.59\text{cms}$, 高=1.5m)之沖淤分布 .	25
圖 2-13 直線型、上拱型、下拱型固床工河床沖淤深度圖	27
圖 2-14 直線型、上拱型、下拱型固床工洪峰底床剪應力	27
圖 2-15 水槽試驗實驗、儀器照片	28
圖 2-16 上拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與壓力之關係圖	29
圖 2-17 下拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與壓力之關係圖	29
圖 3-1 梗枋南勢溪集水區圖	32
圖 3-2 梗枋南勢溪固床工現況圖	32
圖 3-3 水仙溪流域範圍	34
圖 3-4 水仙溪治理工程完工圖	36
圖 3-5 大溪溪集水區示意圖	37

圖 3-6 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程示意圖	38
圖 3-7 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程完工現況圖	38
圖 3-8 修正三角形單位歷線圖	40
圖 3-9 修正三角形單位歷線 1	43
圖 3-10 修正三角形單位歷線 2	43
圖 3-11 水文設計應用手冊總降雨深度	46
圖 3-12 2 年重現期距雨型	47
圖 3-13 50 年重現期距雨型	47
圖 3-14 梗枋南勢溪 2 年重現期距逕流歷線	49
圖 3-15 梗枋南勢溪 50 年重現期距逕流歷線	49
圖 3-16 水仙溪之 2 年重現期距逕流歷線	50
圖 3-17 水仙溪之 50 年重現期距逕流歷線	50
圖 3-18 大溪溪之 2 年重現期距逕流歷線	51
圖 3-19 大溪溪之 50 年重現期距逕流歷線	51
圖 4-1 固定之網格分量示意圖	55
圖 4-2 各單元參數示意圖 1	56
圖 4-3 單元參數示意圖 2	56
圖 4-4 開放及閉合邊界條件	63
圖 4-5 相鄰開放邊界條件之間的所需間隙	65
圖 4-6 梗枋南勢溪正射影像	68
圖 4-7 梗枋南勢溪數值地表模型(DSM)	68
圖 4-8 水仙溪正射影像	69
圖 4-9 水仙溪數值地表模型(DSM)	69
圖 4-10 大溪溪正射影像	70

圖 4-11 大溪溪數值地表模型(DSM).....	70
圖 4-12 梗枋南勢溪多處河段河床表面巨石	72
圖 4-13 植被型河道複合式曼寧 n 值.....	74
圖 4-14 水仙溪工程現況圖	75
圖 4-15 大溪溪工程現況圖	76
圖 4-16 實驗儀器與量測	78
圖 4-17 水仙溪流域範圍地質示意圖	79
圖 4-18 新北市境內土壤分布狀況圖	80
圖 4-19 大溪溪集水區五萬分之一環境地質圖	81
圖 4-20 大溪溪集水區土壤分布圖	82
圖 4-21 梗枋南勢溪採樣孔號位置	83
圖 4-22 水仙溪下游野溪治理工程點位	84
圖 4-23 水仙溪溪流不同斷面點位位置	84
圖 4-24 大溪溪集水區河床質採樣點位分布圖	86
圖 4-25 安息角角度量測	88
圖 4-26 設置最大沖刷深度（以梗枋南勢溪為示意圖）	89
圖 4-27 不同網格大小呈現圖	92
圖 4-28 網格敏感度分析	93
圖 4-29 不同 Courant Number 沖淤模擬圖	97
圖 4-30 GIS 取點計算示意圖	98
圖 4-31 Courant Number 敏感度分析	99
圖 4-32 梗枋南勢溪現況圖	100
圖 4-33 水仙溪河寬示意圖 1	101
圖 4-34 水仙溪河寬示意圖 2	101

圖 4-35 水仙溪左岸之敏感度分析	102
圖 4-36 水仙溪河床中心之敏感度分析	102
圖 4-37 水仙溪右岸之敏感度分析	102
圖 4-38 大溪溪河寬示意圖 1	103
圖 4-39 大溪溪河寬示意圖 2	104
圖 4-40 各輸砂公式粒徑試驗分佈圖	106
圖 4-41 各輸砂公式坡度試驗分佈圖	107
圖 4-42 各輸砂公式水深試驗分佈圖	108
圖 4-43 各輸砂公式土壤顆粒密度試驗分佈圖	109
圖 4-44 各輸砂公式單寬流量試驗分佈圖	110
圖 4-45 各輸砂公式臨界剪應力試驗分佈圖	111
圖 4-46 Meyer-Peter and Mueller 沖淤趨勢圖	113
圖 4-47 Nielsen 沖淤趨勢圖	113
圖 4-48 Camenen and Larson 沖淤趨勢圖	114
圖 4-49 Wong1 沖淤趨勢圖	114
圖 4-50 Wong2 沖淤趨勢圖	115
圖 4-51 新北市境內土壤分布狀況圖	119
圖 4-52 水仙溪下游野溪治理工程圖 1	119
圖 4-53 水仙溪下游野溪治理工程圖 2	120
圖 4-54 大溪溪集水區土壤分布狀況圖	121
圖 4-55 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 1	121
圖 4-56 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 2	121
圖 4-57 梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說 1	123
圖 4-58 梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說 2	124

圖 4-59 梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說 3.....	124
圖 4-60 梗枋南勢溪三段間距範圍.....	125
圖 4-61 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-6 號沖淤圖	126
圖 4-62 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-15 號沖淤圖(1-6 號區段)	126
圖 4-63 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-23 號沖淤圖(1-6 號區段)	127
圖 4-64 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-23 號沖淤圖	128
圖 4-65 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-15 號沖淤圖	128
圖 4-66 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-2 斷面沖淤面積百分比	129
圖 4-67 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-6 號沖淤圖	131
圖 4-68 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-15 號沖淤圖(1-6 號區段)	132
圖 4-69 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-23 號沖淤圖(1-6 區段)	132
圖 4-70 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-23 號沖淤圖	133
圖 4-71 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-15 號沖淤圖	134
圖 4-72 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-2 斷面沖淤面積百分比	135
圖 4-73 梗枋南勢溪不同重現期距整體沖淤圖比較.....	137
圖 4-74 水仙溪下游治理工程圖 1.....	139
圖 4-75 水仙溪下游治理工程圖 2.....	140
圖 4-76 水仙溪下 2 年重現期距之沖淤圖	140
圖 4-77 水仙溪下 50 年重現期距之沖淤圖	142
圖 4-78 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 1.....	143
圖 4-79 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 2.....	144
圖 4-80 大溪溪下 2 年重現期距之沖淤圖	144
圖 4-81 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 3.....	145
圖 4-82 大溪溪下 50 年重現期距之沖淤圖	146

圖 4- 83 梗枋南勢溪不同重現期距整體沖淤圖比較.....	148
圖 4- 84 水仙溪不同重現期距整體沖淤圖比較.....	149
圖 4- 85 大溪溪不同重現期距整體沖淤圖比較.....	149

表目錄

表 2-1 直線型與上下拱型固床工之比較表	20
表 2-2 拱型固床工不同拱度之流量與損失係數之迴歸式	30
表 3-1 梗枋南勢溪水文基本資料	41
表 3-2 有效降雨延時推估	42
表 3-3 梗枋南勢溪之降雨強度公式計算	45
表 4- 1 Riverflow2D 底床載輸砂公式	62
表 4- 2 模式建議邊界條件	63
表 4-3 開放邊界條件類型	64
表 4- 4 底床載邊界條件旁放量對應表	65
表 4- 5 曼寧粗糙係數 n 值之參考公式	73
表 4- 6 水溫與校正係數 k 表	78
表 4- 7 網格距離數量對應表	91
表 4- 8 各輸砂公式試驗範圍之比較分析表	105
表 4- 9 不同輸砂公式模擬結果	116
表 5- 1 預定工作進度表	154
表 5- 2 各組工作人員之主要工作項目表	155
表 5- 3 本計畫主要工作人員之背景與專長一覽表	156

第一章 前言

第一節 緣起與目的

目前國內野溪治理規劃設計單一固床工或系列固床工時，由於沒有準則參考依據，經常以技師本身之經驗歷練處理相關細節，對於整體治理工程效益存在極大之不確定性，且對於固床工布設原則，均為針對防災需求依溪床坡度訂定，未有更具學理依據之理論。由於系列固床工中，上、下游固床工之設置位置、高程、型式所導致之沖刷淤積都會互相影響。特別是河道彎曲處，系列固床工之規劃設計能否減緩凹岸沖刷和凸岸淤積，更是經常為專家學者所爭議者。合適間距、型式與高程之系列固床工可以調整野溪流況、穩固河床、導正流心，維持河川基流量，並營造深潭、淺灘、急流與緩流等多樣性流況，以提供魚類棲息、覓食、避難和繁衍棲地。

因此，本研究將彙整國內外文獻研究成果，設計不同型式、間距之系列固床工模型，以現地觀測地形為背景，藉由二維輸砂數值模擬軟體，探討設計不同組合間距、型式與高程之系列固床工時之水理、沖淤特性，求得防災與生態保育可以得兼之組合，並以更完整之物理參數做為未來工程施作之依歸。本團隊已於過去計畫針對直線型與拱形固床工進行個別之水槽試驗與數值模擬，分析其個別之力學性質與沖淤特性，因此本研究將結合過去之成果進一步分析不同組型式之水理特性，以提供規劃設計參考。

第二節 工作項目與內容

本研究將彙整國內外文獻研究成果，設計不同型式、間距之系列固床工模型，並尋求與水保局台北分局合作，運用現地觀測地形，藉由二維輸砂數值模擬軟體，探討不同組合系列固床工之水理、沖淤特性，求得防災與生態保育可以得兼之組合，工作步驟如下：

一、蒐集國內外不同型式、間距系列固床工相關文獻

本團隊預計蒐集國內外不同型式、間距系列固床工之水流特性、沖刷類型、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等有關之文獻資料，了解其設計應用以及模式分析時所需考慮之水理機制與設計因子估算方法，並針對其設計可能遭遇的問題進行分析。

二、以臺灣多處不同地形現地資料為觀測及研究為背景

本團隊將選取臺灣至少三處以上現地資料進行觀測及資料蒐集，將取得之現地固床工現地布置之資料，包括設計圖，上下游邊界流速，輸砂量，土壤性質分布等，並進行空拍，納入數值模式，建置現地地形，使數值模式資料更加完善。

三、建構不同組合之模型供數值模擬軟體使用

本團隊本項目將結合所蒐集之國內外不同組合間距、型式與高程系列固床工資料及臺灣多處不同現地地形觀測資料，進行歸納分析並設計建置不同組合之固床工模型供後續數值模擬軟體所使用。

四、應用二維輸砂數值模擬軟體 RiverFlow2D 模擬不同組合模型

本團隊將以建構好之不同組合之模型與現地所蒐集之水理、土砂資料，以二維輸砂數值模式 RiverFlow 2D 進行情境模擬，交相分析探討不同流量及不同組合之模擬結果之水理特性。

五、整理歸納結果之水理特性並求得防災與生態保育最佳組合

本團隊將分析探討之結果整理歸納不同組合之系列固床工水理特性，並依據成果對應防災及生態保育之需求，求得防災及生態保育最佳組合之系列固床工，並將成果結論與建議提供未來規劃設計參考。

第三節 預期成果

一、完成不同型式、間距系列固床工相關獻文獻與資料收集

二、完成蒐集現地系列固床工布置資料

三、完成建構不同組合之模型

四、完成 RiverFlow 2D 二維輸砂數值模擬

五、完成結論歸納整理並求防災與生態保育最佳組合

第二章 固床工水理機制相關文獻與資料收集

本團隊於預期成果(一)中內容將在本章說明，本團隊蒐集了國內外有關固床工的文獻資料，其中包括國內外不同型式、間距系列固床工之水流特性、沖刷類型、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等資料，以瞭解其設計應用時所需考慮的水理機制、設計因子估算方法以及模式分析方法，並針對其設計可能遇到的問題進行分析。

水土保持局 2005 年所出版之水土保持手冊有關固床工之定義為：固床工為一個橫向構造物，可以與河床齊平或略高於河床面，同時常採用連續施設方式而構成一系列固床工，以擴大河道的保護區段。其目的有下列二項：

1. 有效抑制河床面泥砂的輸移，防止河床產生嚴重沖刷現象。
2. 可以緩和床面及兩岸的流速，具有整流、導流、減緩沖刷、調整河床坡度等功能。

而 2017 年正在修訂的水土保持手冊則有：固床工(ground sill)為保護溪床免於被洪水沖刷下切的一種橫向阻水構造物，可以略低於溪床、或與溪床齊平、或略高於溪床面(有效高度以不超過 1.0m 為原則)。因固床工上游僅有小規模的土砂蓄積，具有調降溪床坡度，以調節水流流速，惟其主要功能在於洪水時得以控制溪床高程，免於被洪水持續沖刷而影響兩岸構造物或土地之安全。

再者，拱型固床工有多項待討論之議題，其問題如下：

1. 拱型固床工將水流集中在固床工中央下游處排放，增加沖擊力，其沖刷坑會較直線型固床工深，基礎深度必須比直線型固床工深。

2. 拱型固床工係利用圓弧之特性將應力由兩側拱腳張力分擔，因此，拱型固床工拱腳與護岸界面之結構需要依圓拱之角度重新分析設計。
3. 河水溢流過拱型固床工之水壓力需要分段計算，避免傾倒或滑動等安定分析不足問題產生。
4. 當水深小於拱型固床工頂高時，水流會順著圓弧往兩側流動，拱腳與護岸界面在水流沖擊下需要加強保護，避免界面處被沖擊崩壞。
5. 依據水土保持手冊，設計之拱型固床工和直線型者一樣，可以達成調整河床坡度之目的。
6. 目前許多直線型固床工因為不同規劃設計原因而有基礎淘空現象，在未解決這些肇因之前，拱型固床工淘空之可能性會更大。
7. 營造生態棲地並非固床工規劃設計之目的，任何型式固床工都可以在其下游處營造深潭，適當之複式斷面設計亦可方便魚類溯游。

本研究初步蒐集文獻將分為固床工水理特性、沖刷回歸參數因子以及數值模擬分析等三大部分，如下列所示，往後會再將其各部分之文獻擴大收集至每部分 10 篇以上，以利其研究更加完整：

第一節 固床工水理特性

一、 吳嘉俊(2016)[國內]

- (一) 透水式固床工可改變了溢流水深及渠床淘刷，使淘刷規模得以減緩，但透水式固床工趾部的局部淘刷深度及其規模仍以渠槽坡降的影響最為明顯。當流量逐漸增加時，不同透水式

固床工之間通透率的差異對於固床工趾部及渠床的局部淘刷的影響差異則逐漸縮減。

(二) 模型試驗結果說明了高通透率的透水式固床工較適用於流量小、渠床坡度較緩的環境。但由於渠床坡度陡時，較容易因為穿透射流作用，造成固床工趾部局部淘刷深度的發生位置較貼近於固床工，因此不建議用於渠床床質粒徑偏細、渠床坡降陡的溪床。

(三) 低通透率的透水式固床工較適合應用於渠床坡度小於 6% 的環境，其降低固床工趾部局部淘刷深度的效益可達傳統式固床工的 69%，亦可將最大淘刷深度發生位置推離固床工基礎，且亦具備降低溢流水深水頭落差的功能。

二、 郭昌樺(2002) [國內]

因固床工設置於河床底而增加底床的糙度，故當固床工間距越小，其加糙效應愈顯著，使泥砂流出量越低。

(一) 藉由平均沖刷率與固床工數量之關係，可以看出固床工間距愈小，數量愈多，和床面泥砂平均沖刷率越低的總體趨有關勢，足以證明固床工具有穩定河床之功能。

(二) 由泥砂沖刷分配率可知，固床工在保護河段內所發揮的作用是由上游而來的沖刷能力往下游傳遞，以減少保護段內的沖刷量來達到保護的作用，而其對降低全河段之泥砂沖刷量的效用，效果並不比保護段來的顯著。

(三) 帶工間距為渠寬的 2~7 倍時有激增的現象且接近巔峰值，似乎在 $L=32\text{cm}$ 時接近最高值，故在本研究帶工間距中，

$L=32\text{cm}$ 可作為最適間距之考量。即是帶工間距為渠寬的 4 倍時，對保護段河床沖刷現象的轉移，以及讓水流功率消耗而達到抑制挾砂能力的作用，有最佳的效果。

三、 D'Agostino(1994) [歐]

當固床工下游產生局部淘刷現象時，於淘刷坑的下游會形成淤積砂丘。D'Agostino 將淤積砂丘分成兩類，分別為長砂丘和短砂丘。高泥砂產量之淘刷坑往往於下游發展出長砂丘，而長砂丘之發展，有助於降低回水效應(backwater effect)；另一方面，低泥砂產量的淘刷坑則產出短砂丘，而短砂丘的形成，可侷限回水效應的傳播。

四、 Bennett et al.(2000) [美國]

此研究說明當水流通過固床工時，水流於投潭過程中會形成兩股方向相反的循環渦流；其中一股渦流朝下游方向觸及渠床，而另一股渦流朝上游方向溢流而出。朝向上游方向的渦流，其主要的作用在於侵蝕渠床床砂及抵抗投潭水流，使淘刷坑上游滑動面維持動態平衡(dynamic equilibrium)。另一方面，朝下游方向的渦流，其大部分能量消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂，同時保持淘刷坑下游滑動面的平衡。

五、道上正規、鈴木幸一(1979)[日本]

兩人將沒有任何構造物保護之河床與河床上構築固定河床等保護工程在進行沖刷行為後互相比較，得出了有固床工程之上游河床沖刷得到了控制但保護工程下游面的河床平均沖刷深度卻因此變大。

六、張則安、游繁結(1994)[國內]

張則安證實了在河床面上興建固床工能有效地增加河床糙度、減緩平均流速，進而降低水流剪應力以減少泥砂運移之機會，說明固床工是一有效保護河床之水工構造物。

七、高忠人(2018)[國內]

說明了大部分之渠床沖刷行為可分為三種類型，包含一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷。一般沖刷即渠床因水流作用產生泥沙運移、高程下降之情況，也根據 Melville and Raudkivi(1977)之研究，將一般沖刷可分為長期沖刷與短期沖刷，短期沖刷多意旨在連續數個大量水流沖刷下所形成的高程下降，可能原因包括:水流之集中聚合、底床型式之遷移等。至於長期沖刷是為長時間尺度之一種沖刷行為，其成因亦與長期自然侵蝕、底床坡度增加、河岸側向侵蝕、水中構造物設置不良等因素相關；束縮沖刷則是因河道建設水工構造物時導致通水斷面縮小，流速增加，進而對水工構造物造成沖刷之情況；局部沖刷則是指渠道中設有水工構造物時，水流受到構造物局部的阻礙，而在水工構造物前方產生壅水或渦流導致剪應力增大，並對底床產生局部的沖刷行為。

第二節 沖刷回歸參數因子

一、黃政達(1995)[國內]

利用動態平衡理論、室內動床試驗以及野外實地調查將資料予以修正，得到固床工間距與河道下游總輸砂率、含砂水流之流速、雷諾數及福祿數等泥砂水理參數間之關係，由此得知最佳固床工密度所造成之水理特性並推導出現場動床固床工間距之公式。

$$L = 4.67d_{65}^{0.14}H_1^{-0.73}S^{-0.45}$$

式中，

L 為固床工間距(m)； d_{65} 為河床質代表粒徑(m)； H_1 為設計流動水深(m)； S 為原河床坡度(%)。由上式得知當流動水深增加或河床坡度較陡時，固床工之間距應縮小。

二、游繁結(1995) [國內]

在滲流影響非常小的情況下，以清水流對三組均勻砂及兩組非均勻砂進行水工模型試驗。試驗結果認為 D_{50} 為一適宜之代表粒徑，且固床工間距之減少的確有降低水流剪力及減少淘刷量之功能。

三、何國勇(2007) [國內]

此研究針對近直線弧形開口式固床工進行水工模型試驗，試驗結果得知：

- (一) 固床工開口數量的增加，得以分散水流對開口下游底床的衝擊，使淘刷坑範圍縮小，淘刷深度變淺，且由於水流的分散而使開口下游淘刷坑水流形成漩渦，以致流速減緩。
- (二) 床型高程歧異度為淘刷坑深度變化之指標，其值隨著固床工開口數量的增加、床質粒徑的粗化、渠道坡度的減緩及流量的降低而減少。

四、Aderibigbe et al. (1998) [加拿大]

其於研究中發現福祿數與淘刷坑長度及深度之相關性，提出中值粒徑大小為河床質發展及淘刷坑變化的重要影響因子，同時渠道傾斜程度及漸變水深變化亦是另一決定因子，尤其是漸變水深變化的程度直接影響了淘刷變化的過程，其原因是構造物設置後所產生水躍程度與類型之沖擊角度直接對淘刷坑深度產生作用。

五、Melville-Coleman (2000) [澳]

底床特性影響因子包括底床質中值粒徑(D_{50})、幾何標準偏差(σ_g)、底床質密度(ρ_s)等。若已知底床質中值粒徑(D_{50})且溫度與顆粒變化不大時，即可由 Shields 臨界啟動曲線(Shields,1936)，推求其相對之臨界啟動剪力速度(critical shear velocity, u_{*c})。Melville-Coleman 重新迴歸臨界啟動試驗數據獲得下式：

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125D_{50}^{1.4} \quad 0.1\text{mm} < D_{50} < 1\text{mm}$$

$$u_{*c} = 0.0305D_{50}^{0.5} - 0.0065D_{50}^{-1} \quad 1\text{mm} < D_{50} < 100\text{mm}$$

可由水深(y)推求底床質臨界啟動速度，如下式：

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \log(5.53 \frac{y}{D_{50}})$$

其中， V_c 為底床質臨界啟動速度， u_{*c} 與 V_c 之單位為 m/s。

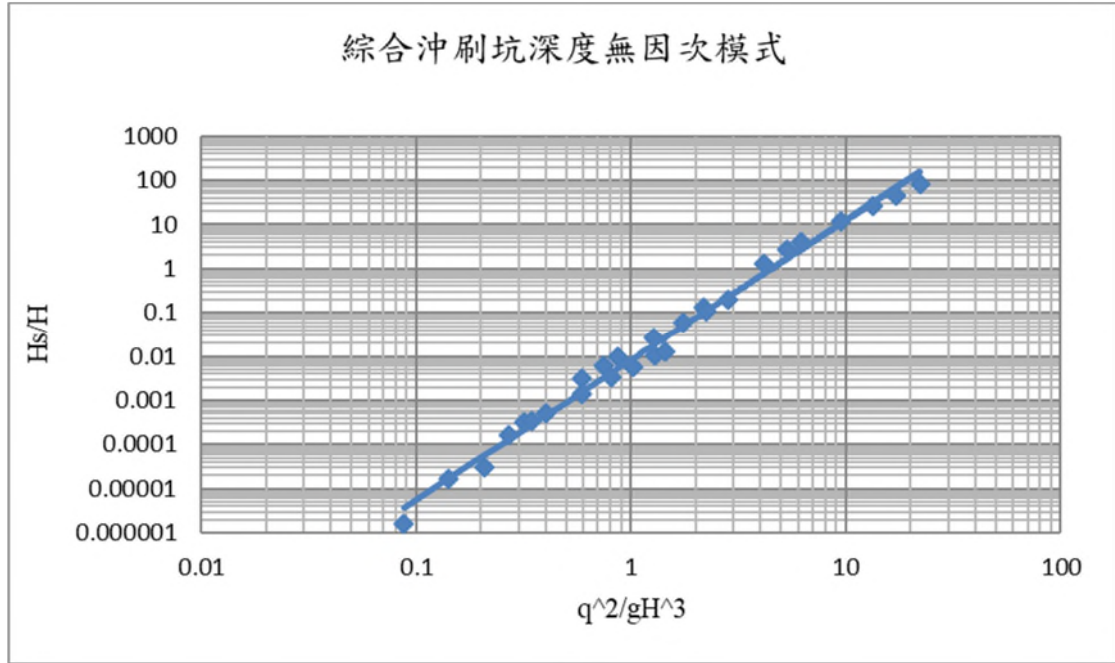
六、黃宏斌 (2016) [國內]

綜合前人公式與本研究之沖刷坑深度無因次模式(如圖 2-1)如下述公式：

$$\frac{h_s}{H} = 1.301 \left(\frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.4004} \left(\frac{d}{H} \right)^{-0.5019}$$

式中：

h_s 為沖刷坑深度(m)； H 為壩高(m)； q 為單寬流量(cms/m)； d 為渠床粒徑(m)； g 為重力加速度(m/s^2)。



資料來源：黃宏斌，2016，105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治方法之探討

圖 2-1 綜合沖刷坑深度無因次模式圖

七、Dietz (1972) [美]

其研究提出以淘刷坑斷面流速描述淘刷坑之平衡深度：

$$\frac{y_m}{y_{m,e}} = \frac{\omega(U_0 - U_C)}{U_C}$$

式中，

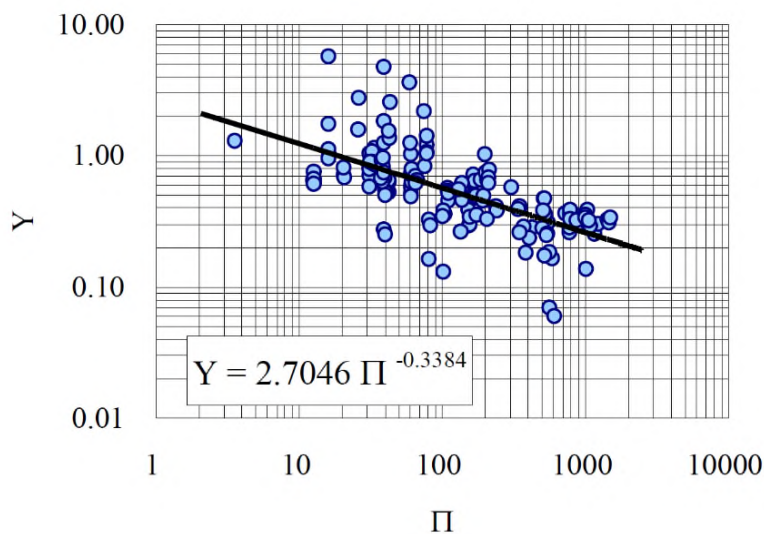
y_m 為最大淘刷深度(m)； $y_{m,e}$ 為平均淘刷深度(m)； U_C ：臨界流流速(m/s)； U_0 ：斷面平均流速(m/s)、 $U_0 = Q/A$ ， Q 為固定流量(m^3/s)、 A 為通水斷面(m^2)； $\omega=1+3\gamma_0$ ， γ_0 ：紊流強度係數。但Dietz 所提出的公式中僅探討淘刷坑的平衡淘刷深度，並未將構造物間距、溪床床質與溪床坡降等因子納入考量，因此其研究之實用性還需依不同之區域進行調整。

八、Wu et al. (2002) [國內]

將吳嘉俊(2000)之研究資料進行彙整分析，獲得帶工下游淘刷坑之幾何形狀公式如下，而淘刷坑幾何形狀(Y)與相關水理參數(II)之關係圖如圖 2-5 所示。

$$Y = \left(\frac{d_{sc}}{L_{sc}} \right) = f(\Pi) = 2.7046 \left(\frac{1}{(S_g - 1)D_{50}SL_I} \sqrt[3]{\frac{q^4}{g^2}} \right)^{-0.3384}$$

其中， d_{sc} =帶工下游溪床最大淘刷深度(m)、 L_{sc} =帶工構造物下游面至下游淘刷坑最大淘刷深度的水平距離(m)、 q =整治段之單寬流量(cms/m)、 S_g =溪床床質比密度、 g =重力加速度、 S =溪床水力坡降、 D_{50} =溪床床質中值粒徑(m)。



資料來源：Wu C.-C., C.-H. Hou, C.N. Chen, and C.-Y. Shih (2002) Determination of groundsills interval for stream training, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. 4(6)

圖 2-2 帶工下游淘刷坑幾何形狀與水理參數關係

(摘自 Wu et al. , 2002)

九、Tregnaghi (2011) [歐]

此研究結果可以得到沖刷深度隨時間的變化，而固床工下游的時間沖刷趨勢可演變為無因次曲線，其最大沖刷深度可由非線性回歸關

係來確定的。

十、林榮紹、連惠邦(2001) [國內]

其運用水槽試驗分析渠槽設置固床工前後之泥沙運移的情形，結果顯示固床工其間距對下游河床有一定之影響，並以調整固床工間距作為變動條件，得出最佳的固床工間距應為 4 至 10 倍常流槽寬。

第三節 數值模擬分析

一、王傳益等人(2004) [國內]

其研究藉由 SMS 模式針對不同水力條件下之固床工形式與設置間距進行模擬，結果顯示鋸齒式固床工較傳統式固床工之消能與整流效果為佳。

二、李豐佐等人(2017) [國內]

用無人飛行載具(UAV)於中沙大橋下游固床工拍攝之影像，提供固床工變動及周圍流場分析使用，經研究結果顯示固床工辨識軟體應用於現地，輔以人工辨識後能成功計算固床工各別面積及比較面積差異，以及固床工中心位移量。而提出之大尺度粒子影像分析法亦已證實能應用於現地固床工周圍流場分析，然分析流速時則需要佈設地面控制點，將影像進行校正後才能進行流速分析。

由於無人飛行載具以及電腦數值模擬軟體之進步，透過模擬能大幅降低實際實驗所需之時間以及經費，且可以依模擬情況隨時調整參數，並能有一定之準確度。

三、楊廣培(2015) [國內]

透過 COMSOL Mutiphysics 軟體模擬不同尺度河床載於不同流量

下之運動行為，分析預測河床中固床工遭受卵礫石撞擊之情形，以此做為後續補強固床工混凝土強度之建議，且可參考模擬結果之撞擊位置及分布，改變固床工之幾何布置。

四、張程凱(2016) [國內]

運用三維模擬軟體 Fluent 針對固床工下游側平衡前後沖刷坑，進行流場數值模擬，以瞭解不同流量於平衡前後坑內不同位置之水理狀況，分析項目包刮平均速度剖面、紊流強度以及雷諾應力。經過模擬得出水躍以及平均流速剖面均與實測資料相當一致，以及得到紊流強度與流量呈正相關。

五、Faeh (2007) [歐]

此研究利用 2dMb 模型進行數值模擬堤壩侵蝕情形，其中考慮了不同流量、輸砂情況之間的相互作用，由模擬結果顯示堤壩破壞情形供後續維護建議。

利用水理模式進行數值模擬對水工構造物於溪流中之影響目前已廣泛應用於水利、水保工程中，例如淹水潛勢評估、工業區水質模擬、堤防溢堤安全分析、外水防洪工程配置等等，現今由於科技的日新月異，不像以往只能依靠經驗而去做判定，現在多了數值模擬方法能以科學的角度去探討，是值得去研究探討的方向數值模擬可視為分析泥沙運移機制與過程的重要工具，隨著科學的進步，目前仍不斷被開發與創新。除了國內，國外如歐美日等國家也利用二維模式進行數值模擬行之有年，以數值模擬方式評估潛在危險，並預測危害公共安全之破壞，提供更準確結果分析以供參考。

六、邱彥瑜(2016) [國內]

以大甲石岡壩為例，探討堰壩是否因使用年限失去其效用且會有安全疑慮，也考慮了對河川棲地影響，因此利用數值模式模擬評估壩體移除河道輸砂變化面向及生態影響面向，做為後續壩體改善相關工作之評估參考。

七、李文獻(2012) [國內]

以巴陵壩為例，說明巴陵壩之前為攔砂及穩定水流功能，減緩砂石下移至石門水庫，以減緩水庫之淤積量，保護水庫安全並延長使用壽命，但目前巴陵壩已淤滿失去其功能，因此欲進行壩體拆除，然而壩體拆除必須要有詳盡的分析，才能對其拆除後影響做仔細評估，故文中使用二為水理輸砂模式 CCHE2D 做為數值模擬之工具，分析並預測在壩體移除後水理及輸砂現象之改變以作為決策之參考。

八、周文杰等人(2011) [國內]

文章中以北勢溪為例，應用河川棲地二維模式 River2D 模擬防砂壩不同改善方案之河川棲地重可用面積 WUA，其研究結果發現當以十年重現期距流量進行模擬時，將防砂壩改為連續低壩之型式，河川棲地指數 WUA 將會最高，而當流量以 25 年重現期距模擬時，則是拆除防砂壩指數較高，若以日常生態情況來看，比起完全拆除防砂壩，部分調整其高度更能達到維護生態廊道之目的。

九、詹勳全等人(2017) [國內]

文中宜蘭縣碼崙溪為研究區域，並利用二維水理輸砂模式 CCHE-2D 作為研究工具進行野溪清疏工程不同方案、情境模擬。

文中蒐集碼崙溪樣區基本資料與模式參數資料並對模擬範圍與斷面進行分析與檢定，同時也以不同情境如颱風事件進行情境模擬，而清疏方面也透過模式以不同降低高度或是建置複式斷面等進行不同方案模擬，最終以模擬結果評估個方案成效，若可以以水理模式模擬結果預測溪流底床變化，其分析成效建議可供後續河川整治工程單位使用。

十、胡通哲等人(2017) [國內]

本研究以林務局東勢林區管理處治理範圍的十文溪一號防砂壩為例，進行水工構造物生態面向的調整改善，十文溪一共有 13 做水工構造物，但最需改善的是一號防砂壩。

文中結合了利用 UAV 測量產生正射影像圖建置區域地形資料，同時也進行十文溪生物魚種調查，並配合水工模型試驗與兩種水理模式，分別為一維的 HEC-RAS 與二維的 CCHE-2D，最終結果提出最適合十文溪構造物調整之方式為改良型舟通式魚道，其適用於高、低流量，可供後續工程單位參考使用。

第四節 前期計畫研究成果

一、野溪固床工水理機制試驗分析計畫(2018)

此計畫透過直線型、上拱型、下拱型、對稱上拱型、對稱下拱型，及上拱型且具低水河槽等不同型式固床工之水工模型試驗，與模式之驗證，探討不同型式固床工之水理現象與沖淤情形，並辦理多樣固床工之教育訓練，製作圖說，研擬改善方案及未來研究方向，提供後續工程設計之依據，提升治理功效。

此計畫實際進行各型式固床工之冲刷實驗，以分析比較傳統之直

線型固床工與創新之拱型固床工在水理特性 與沖淤情形上之差異，其中，試驗之拱型固床工將包括純拱型(上、下拱)、具低水河槽的拱型(上拱)與對稱雙拱型(上、下拱)等 3 種型式，以 51 組試驗條件分別變化流量、固床工型式及尾水深度，並採用全面之攝影角度俾利瞭解水流通過固床工時之特性，並進行水理分析，比較各拱型固床工與直線型固床工之間的水理特、沖淤情形之差異。

由實驗結果可以發現上拱型固床工之沖刷坑較直線型深，如又配合低水河槽之設計，中心之沖刷坑深將達到最深。上述之試驗結論與理論是相符的，亦即上拱型固床工會將水流集中往渠道中心排放，故中心之沖刷坑會較兩岸深，而下拱型固床工則是因為其形狀會分散水流，故兩岸之沖刷坑反而較中心深。直線型固床工則是因為水流平均分布故沖刷坑深介於上拱型與下拱型固床工之間。上拱型固床工會在渠道中心創造深潭，而其兩岸之沖刷坑較直線型淺，因此可利用此特性，在河道靠近凹岸處施做上拱型固床工，導引水流遠離凹岸以減緩凹岸的沖刷；下拱型固床工的兩岸沖刷坑較深，利用此特性便可在河道靠近凸岸處設計下拱型固床工，減緩淤積情形，惟設計時應加強兩側護岸之基礎，避免基礎淘空使固床工破壞。

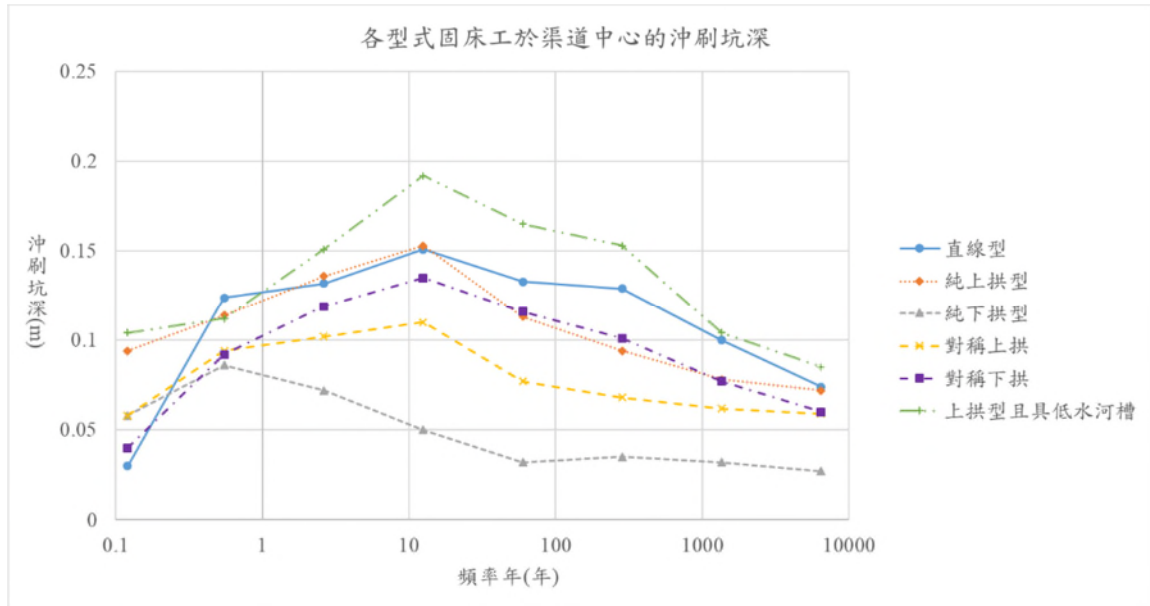


圖 2-3 各型式固床工之流量與渠道中心冲刷坑深之關係

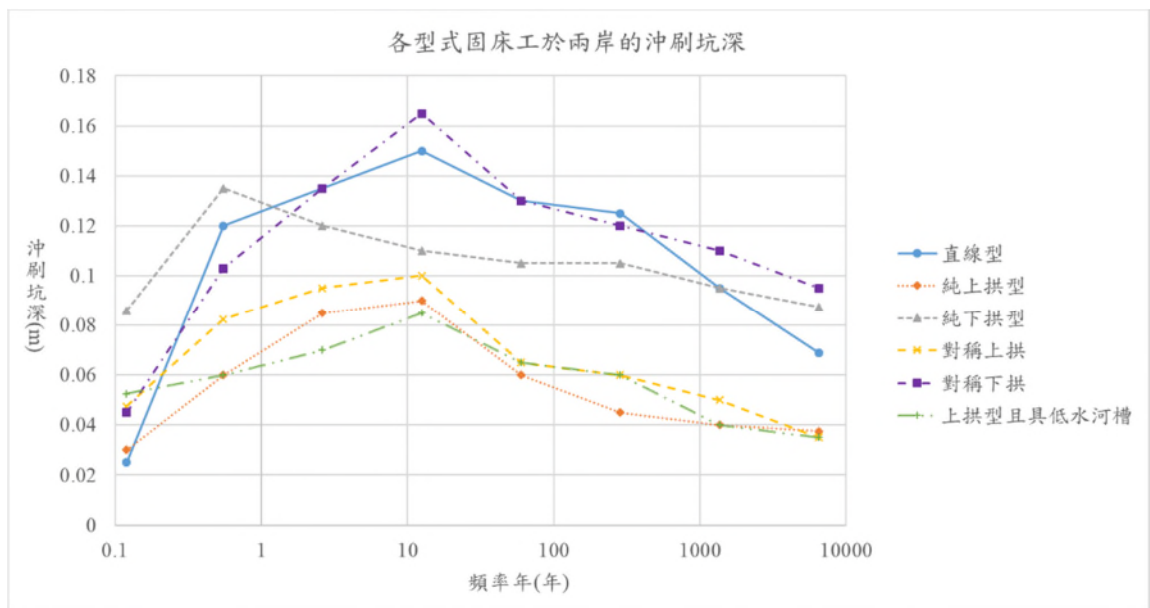


圖 2-4 各型式固床工之流量與兩岸冲刷坑深之關係

不同型式固床工之冲刷深度對於流量都有一致性的關係，亦即呈現上頂型的二次曲線型式，也就是在某一流量會發生最大冲刷深度。當小於此臨界流量，流量增加，水流沖擊力增加，故冲刷深度變深；而超過臨界流量時，冲刷坑深已經發展到某一深度，當沖擊水流無法淘出冲刷坑底部土砂，且冲刷坑邊壁土砂受水流沖擊持續掉落坑內時，會有冲刷坑深度減少之現象產生。水流沖擊力與冲刷坑深度呈正相

關，亦即量測的水流沖擊力愈大，水流之能量愈大，所造成之沖刷坑深度也愈深，然而，當沖刷坑愈深時，導致有效跌水高度增加，會有沖擊力增大之現象發生。

另分析其結構分布，當固床工基礎穩定時，直線型、上拱型、下拱型、對稱上拱型、魚鱗型以及 S 型之最大應力會發生於固床工上游面之底部，因此在材料選擇時 須考量其強度；當基礎淘空時，六種型式固床工之最大應力、力矩多發生於固床工之兩側，因此在設計固床工時，需特別加強保護其兩側拱腳與護岸界面，避免界面處被沖擊破壞。其中，對稱上拱型固床工之應力亦會集中於其中心點位置，在設計時須添加鋼筋增加其抗拉力，以確保其不會從中心點斷裂。而在相同之條件下，流量愈大會有愈強之水流沖擊力，對構造物造成損毀的風險也越高。

最後可以得到，純上拱型、對稱上拱型，及上拱型且具低水河槽的固床工，與純下拱型、對稱下拱型的固床工，在水理特性、沖淤情形及結構分析的部份，僅在沖刷坑深之深淺、水流沖擊力之大小，以及應力、力矩、位移之大小有些微差異，在整體趨勢上均差異不大異不大，故本研究整理直線型、上拱型、下拱型固床工之水理特性、沖淤情形、水流沖擊力、結構分析，功能、美學及應注意事項、改善方案等項目如下表 2-1，俾利較直觀的瞭解三種不同固床工型式的差異性。

表 2-1 直線型與上下拱型固床工之比較表

分類	探討項目	直線型	上拱型	下拱型
水理特性	過流特性	均勻分佈	水流趨中	水流分散
沖淤情形	冲刷坑深	中心 $\approx$ 兩岸	中心 $>$ 兩岸	兩岸 $>$ 中心
	沖淤分佈	均勻分佈	分為大小流量討論	
	圖示		小流量 	小流量 
			大流量 	大流量 
水流	水流	中心 $\approx$ 兩岸	中心 $>$ 兩岸	兩岸 $>$ 中心
沖擊力	沖擊力			
結構分析	應力/力矩	兩側分擔(淘空時)	兩側分擔(淘空時)	兩側分擔(淘空時)
	位移	淘空時集中於中心	淘空時集中於中心	淘空時集中於中心
	安定分析	簡單	複雜	複雜
功能	應用	穩定河床坡度	調整主流方向，營造深潭	減緩兩岸淤積
美學	美學	傳統，較呆板	創新，有變化	創新，有變化
備註	注意事項	表面磨損、基礎淘空	加強固床工基礎深度或減	加強護岸基礎、保護拱角與

二、拱型固床工之力學性質探討計畫(2019)

此計畫接續去年度之野溪固床工水理機制試驗分析計畫，繼續探討拱型固床工水理現象，作為現地工程施作依據。預計透過模擬分析以及水槽試驗，探討拱型固床工之水理現象，提供後續工程設計之依據，並提升治理功效。

在模擬部分，採用兩種模擬程式，一為 Abaqus，其是一套功能強

大的工程模擬的有限元軟件，提供高精度、可靠、高效的解決方案，可應用在水利、地質、勘查、測繪、環境、等多重領域，其解決問題的範圍從相對簡單的線性分析到許多複雜的非線性問題。能解決大型結構問題，土壤力學分析及流體力學分析等。另一者為 ANSYS-FLUENT 模式，FLUENT 是美國 FLUENT 公司所發展的三維計算流體力學軟體，並以有限體積法為基礎，此軟體已廣泛地被用在空氣動力學、工業工程及建築通風設計、多相流場等。其結構性、非結構網格以及根據求得之解自動細化或粗化網格技術，可讓求得之解獲得更好的精度並提高程式運算效率，在模式運算方面可以透過平行處理，大幅提高運算效率，改善以往三維模式需要長時間運算的缺點，在較短的時間中得到最佳之解。

結果部分，Abaqus 將依據現地固床工之實際大小以及上述所計算之力進行上拱型固床工模擬，並分別呈現假設固床工兩側翼均固定下，底部為固定邊界以及不固定底部共兩種結果，以代表在地基穩固以及地基被淘刷下之情形。由結果可以得出在固定底部之情況下，受力最大為上游面全段底部，約為 250(kN)，而在無固定底部之情形下，受力最大為上游面兩側，約為 1,400(kN)。力矩部分，則是在固定底部之情況下，上游面全段底部為力矩最大值，約為 1,400(N·m)，而在無固定底部之情形下，固床工下游面底部兩側為力矩最大值，約為 8,300(N·m)。

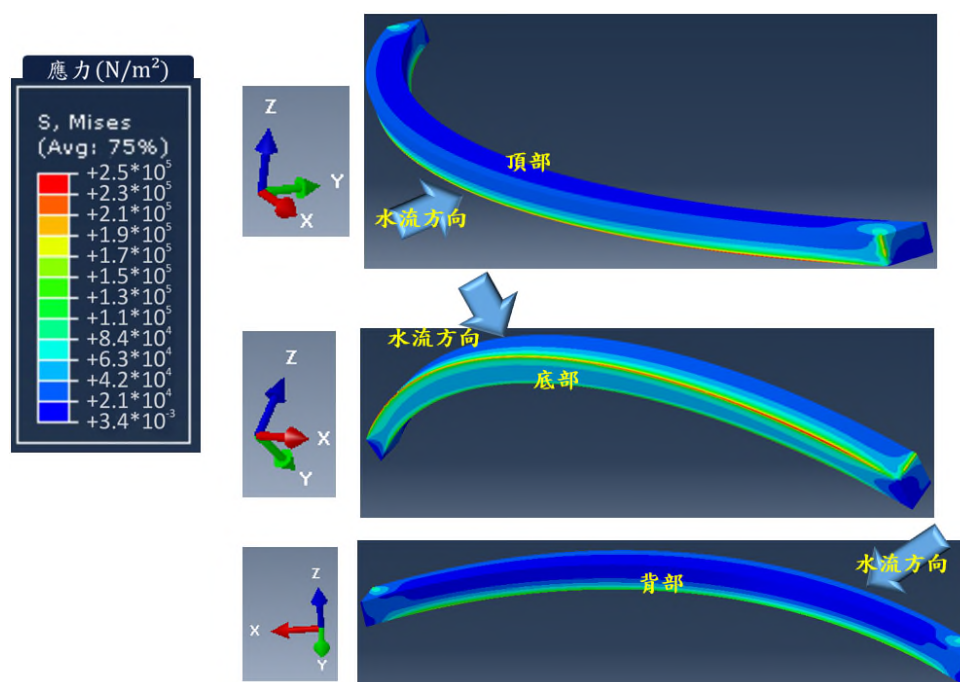


圖 2-5 上拱型固床工固定底部之應力分布情形

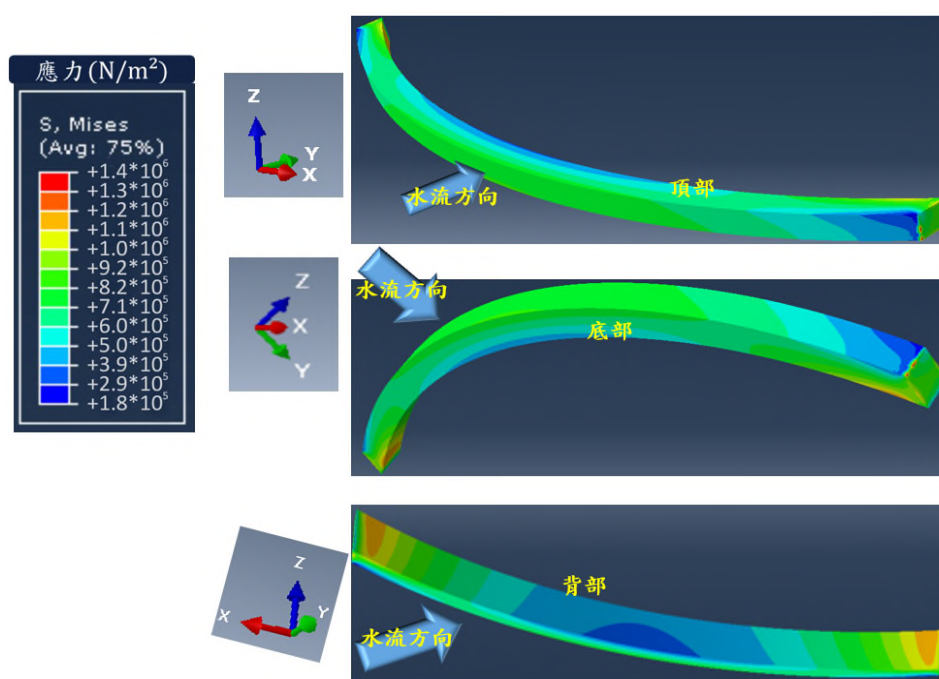


圖 2-6 上拱型固床工無固定底部之應力分布情形

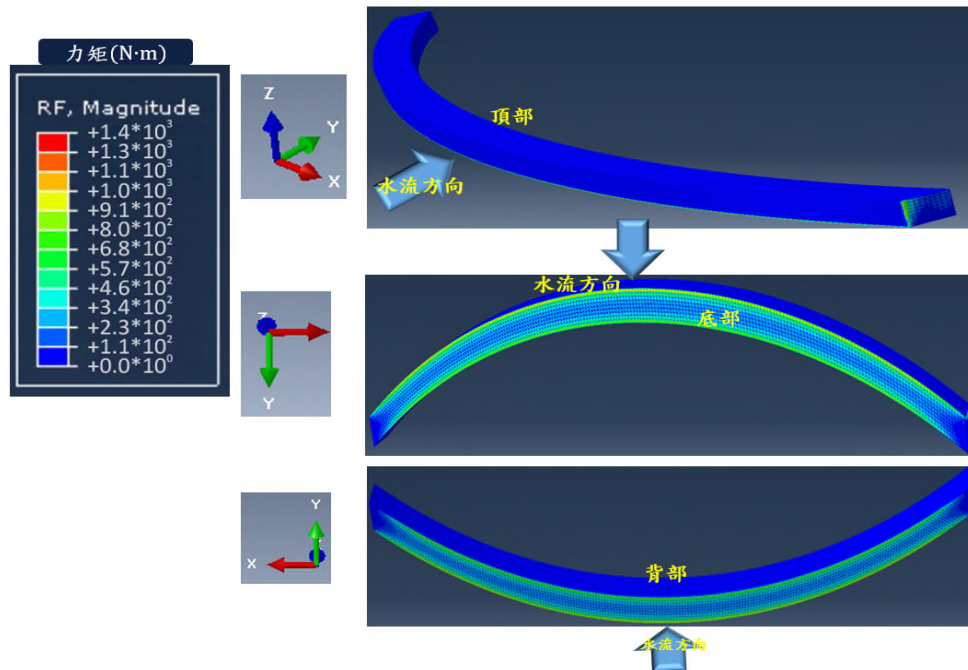


圖 2-7 上拱型固床工固定底部之力矩分布情形

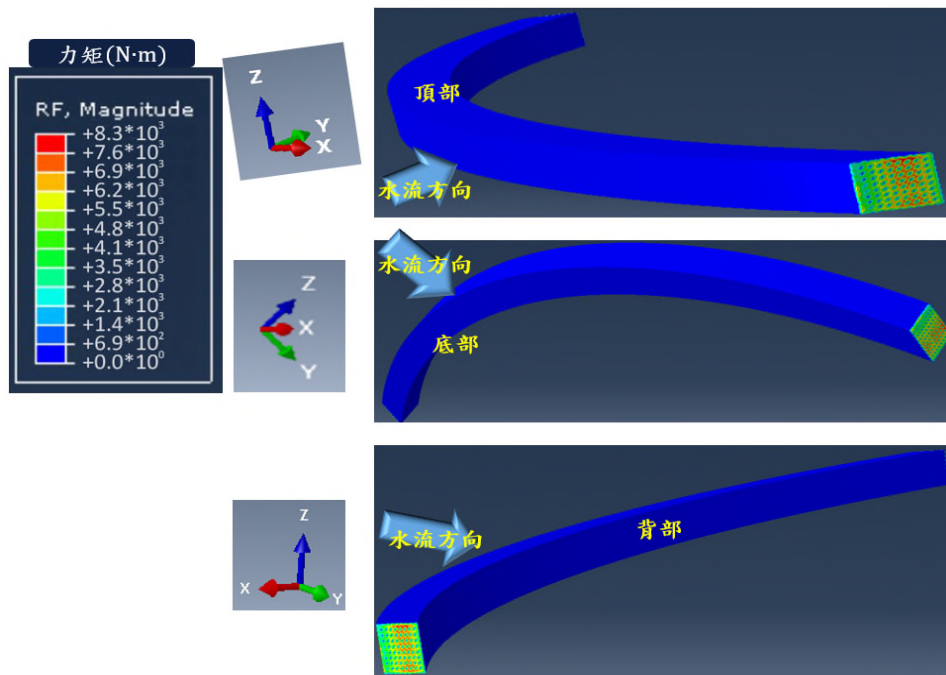


圖 2-8 上拱型固床工無固定底部之力矩分布情形

ANSYS-FLUENT 模式則是用來模擬流速、流線以及流場並與 ABAQUS 交互比較，從結果圖可以看到流線經下拱型分散後，會集中於下游面兩岸之邊壁，經上拱型固床工集中後，會集中於渠道中央，

並產生較大之流速，最大到達 15.48m/s，若經長時間沖蝕而沒有進行補強工作可能會導致河堤掏空，河岸崩落等情形。

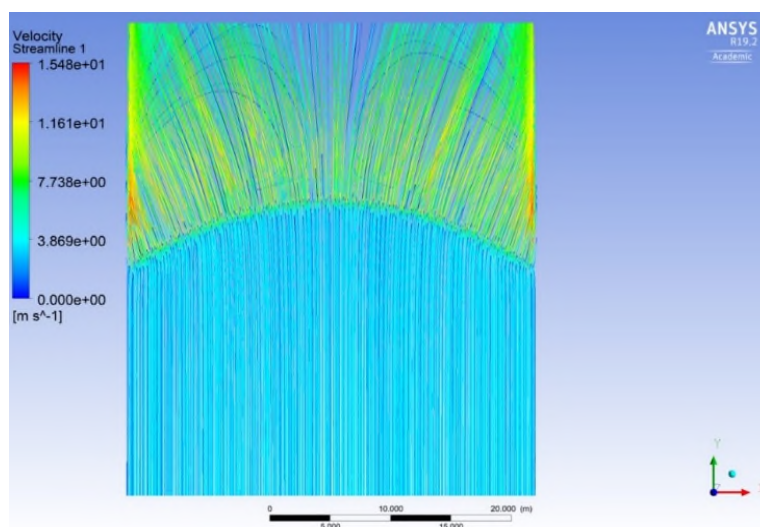


圖 2-9 下拱型流線分布情形俯視圖

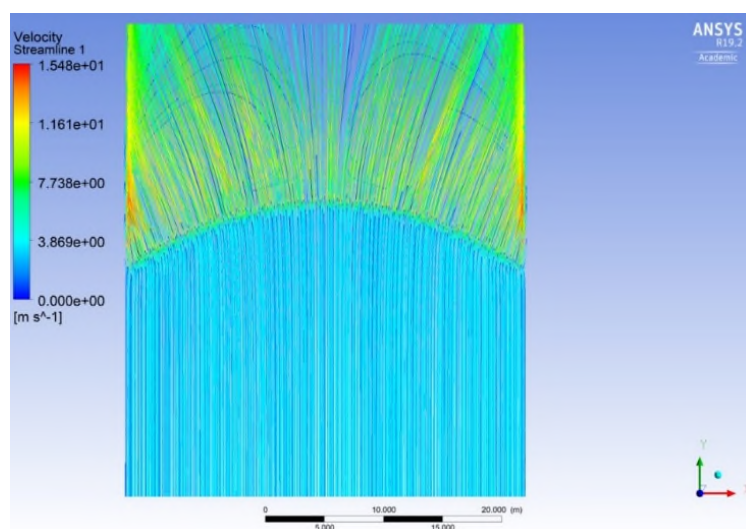


圖 2-10 上拱型流線分布情形俯視圖

此計畫於二維模式輸砂模擬以美國墾務局所研發之 SRH-2D 模式為主，並易使用 RF-2D 模式，此模式輸砂模組控制方程式更為嚴謹，同時考慮懸浮載與底床載運移程式，並綜合水文和水力在河流中模擬動床和污染物擴散的有限元素模型，可以在河流中佈設洪水，模擬洪水氾濫、洪氾平原和複雜的地形。而從沖淤結果分布來看，於

SRH2D 中，在上拱型固床工的上游處大多為淤積，而在固床工的下游處則有沖有淤(左側淤右側沖)，沖刷坑面積僅約 4.6m²，推測原因可能是流量在 73.59 cms 的情況下，固床工主深槽附近的水深約 2m，而固床工低水河槽底與下游渠底的高程差最多約為 37cm，從數值上看來，在高流量情境下固床工對於流況影響並不大，因此通過固床工時，水流加速的效果並不明顯，因此較無法使底床淘刷。下拱型固床工則在上游處之沖淤分布大多為淤積，而在固床工的下游處則有沖有淤(左側淤右側沖)，與上拱型類似，但其沖刷坑總面積較大。

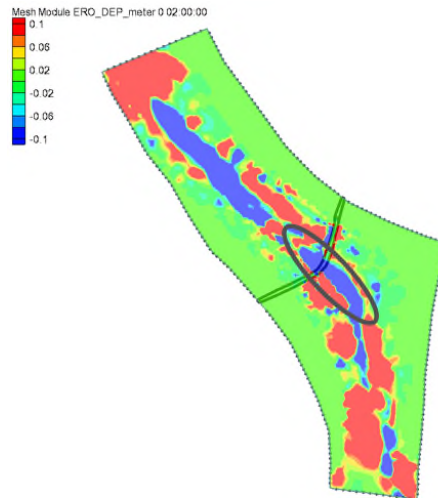


圖 2-11 SRH2D 上拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

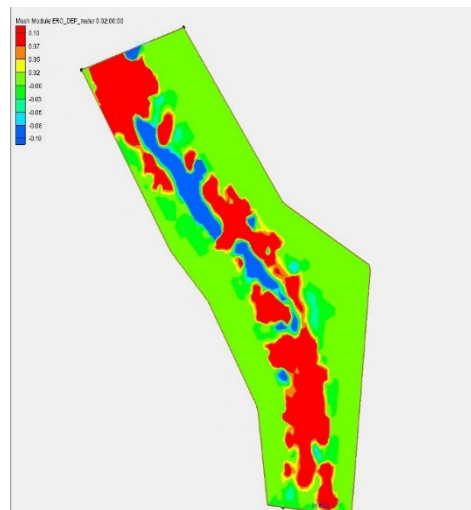


圖 2-12 SRH2D 下拱型固床工(Q=73.59cms, 高=1.5m)之沖淤分布

三、拱型固床工之沖淤探討(2020)

此計畫預計接續去年度之拱型固床工之力學性質探討計畫繼續探討拱型固床工上拱型、下拱型固床工不同曲率半徑之沖淤特性，作為現地工程施作依據。

模擬分析部分，此計畫使用 RiverFlow-2D 模式，此模式輸砂模組控制方程式嚴謹，可同時考慮懸浮載與底床載運移程式。由模擬結果可以發現，直線型固床工上游由於河道坡度較陡，因此雖位於固床工上游仍有較大的沖刷，直到固床工前不遠處才開始淤積。圖中上游及下游各有一處有較嚴重之沖刷(圖中深紅色區域顯示)，由於該兩區域透過 DSM 可以發現目前已淤積嚴重，淤積高度甚至高過固床工高度，推測為造成兩區域在發生 50 年重現期距之流量時有較大沖刷的緣故。然而，因為左岸的坡度較右岸陡，左岸的平均坡度約 0.0507，右岸僅 0.0452，故水流會傾向往左岸集中，而造成較大之沖刷。固床工下游處，因上拱型固床工具有匯聚水流之作用，河心之沖刷加大，比較兩張圖可以看出直線型及上拱型之河心處沖刷強度差異。再者，下拱型固床工之部分，由於固床工較上游地區之坡度較大，水流挾沙力大，因此造成了大面積的沖刷，當水流到了固床工前，由於流速趨緩，水流挾沙力變小，而出現淤積的情形。下拱型固床工之特色為水流會趨向兩岸流動，此一現象可造成水流離開固床工後往兩岸之沖刷變大。固床工所造成之沖刷坑，其泥沙為被帶往下游淤積，可於下列圖中發現，緊鄰下游沖刷處，河道淤積明顯，皆可由模擬結果看出。

而底床剪應力為造成沖刷及淤積的主要因素，可以發現於洪峰發峰時，固床工下游的底床剪應力明顯較上游為大，顯示在洪峰時會有大規模掏刷。在退水段時，下游處則會因為剪應力降低，水流挾帶沙

粒減小而造成淤積，為造成下游淤積之主要原因。上拱型固床工具有匯聚水流之功能，因此底床剪應力最大處集中於河心，可與直線型固床工所產生之沖刷做比對。下拱型固床工有別於上拱型固床工集中掏刷於河心處，下拱型固床工將水流分散後，增加洪峰時固床工下游兩岸底床斷面水流掏刷之剪應力，與直線型不同的地方是，直線型因河流主流走向主要還是匯流於河心，因此直線型固床工下游處仍然無法分散河心底床掏刷之剪應力，下拱型固床工則能分散水流，改善此現象。

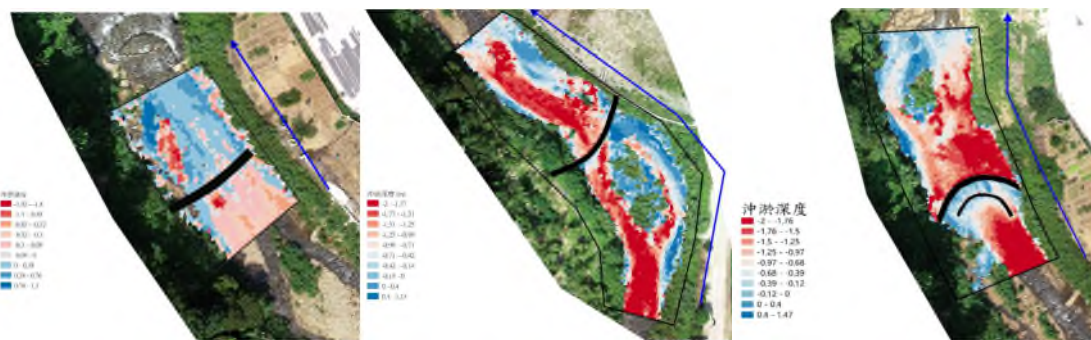


圖 2-13 直線型、上拱型、下拱型固床工河床沖淤深度圖

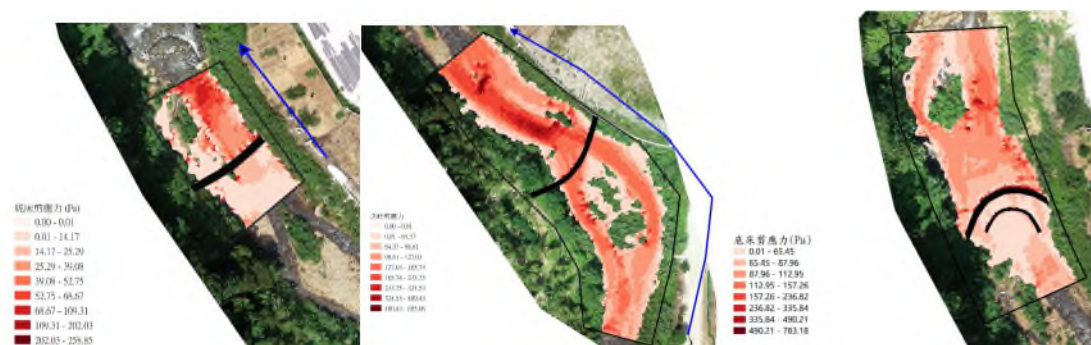


圖 2-14 直線型、上拱型、下拱型固床工洪峰底床剪應力

此計畫亦進行水槽試驗，針對四種不同拱度、高度之固床工進行水槽沖刷實驗，並量測上下游水深、流速，下游沖刷坑大小等，得到水流對固床工之衝擊力及損失修正係數，最後回歸出公式。

水槽試驗是為分析直線型固床工不同高度與拱型固床工不同曲

率半徑在水理特性上之差異。此實驗模型是參考新北市八里區水仙溪下游野溪治理工程之設計流量資料及其延伸流量，進行模型試驗。試驗過程會針對不同之固床工高度、不同流量所造成之底床沖淤變化進行探討。



圖 2-15 水槽試驗實驗、儀器照片

沖刷坑大小乃受流量、跌水高度、粒徑大小、尾水深度、時間及固床工型式等因子影響，且以清水流進行試驗，清水流所造成之沖刷坑比含沙水流深，可預測並考慮到最危險之情況進行探討與分析，而造成之沖刷深度本研究於沖刷平衡後以直尺垂直進行測量，探討固床工下游之底床之沖刷情形。結果得出直線型固床工之沖刷坑於不同位置的沖刷深度大致皆相同，直線型固床工能產生均勻沖刷。而關於上下拱型固床工之沖刷結果可以發現，上拱型固床工水流集中於渠道中心，因而導致渠道中心沖刷深度較深；下拱型則可發現因水流受結構物阻擋而向外分散，導致水流向兩側流動，因此下拱型之下游沖刷可以發現兩側沖刷深度較深，但靠近渠道中心之位置較無明顯趨勢。

改變固床工高度以及拱型之曲率半徑時，可以得出直線型固床工高度越高，固床工下游沖刷即會越深。這可以表示當直線型固床工高度愈大，其水流的能量越大，向下沖刷力也越大，導致沖刷深度越深。

於上拱型部分也可看出當曲率半徑減少，拱度增加時，水流越趨於集中，渠道中心之沖刷深度也會隨之上升。最後，亦有量測固床工上游表面受力值，以探討固床工所受水流之衝擊力，由結果可以發現上拱型固床工因水流集中導致渠道中間之應力值較兩側高，而下拱型固床工則因水流分散導致渠道兩側之應力值會較中間值較高，與之相反，也與前面固床工之沖淤分布趨勢相符合。

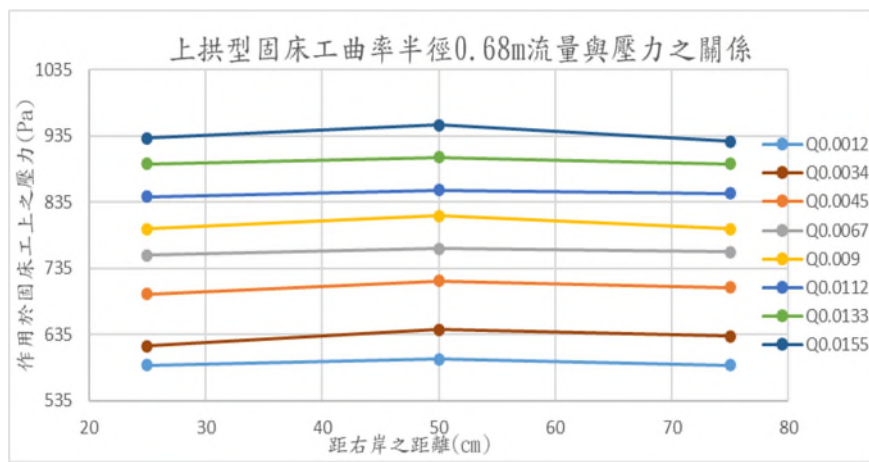


圖 2-16 上拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與壓力之關係圖

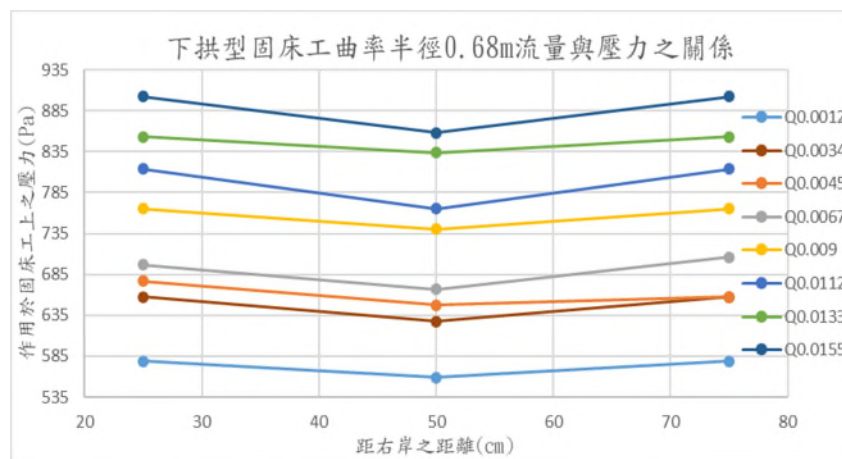


圖 2-17 下拱型固床工曲率半徑 0.68m 流量與壓力之關係圖

亦為了使實驗結果更符合現實，加入一損失修正係數，由於實際上之渠道斷面並非沒有摩擦阻力之存在，不可將其完全忽略，以致渠道水流單位中之實際動能，的大，因此於此研究使用 Bernoulli 方程式之時，其真正之流速水頭應以 $\alpha \frac{V^2}{2g}$ 表之，此係數 α 即為損失係數。

為求其損失係數 α 之迴歸式，本渠道試驗於粒徑介於 0.8mm 至 1.5mm 之間、水平渠坡，拱型固床工高度為 4.5cm 以及流量範圍介於 6Hz 到 32Hz 的條件下，以多項式擬合各拱型 固床工型式之損失係數 α ，公式中 X 為流量(cms)， Y 為損失係數 α 。

表 2-2 拱型固床工不同拱度之流量與損失係數之迴歸式

	曲率半徑	迴歸公式	R Square 值
上拱型 固床工	1.82m	$y = 0.0133X^{-1.448}$	$R^2 = 0.81$
	1.1m	$y = 0.0047X^{-1.629}$	$R^2 = 0.95$
	0.82m	$y = 0.0114X^{-1.349}$	$R^2 = 0.95$
	0.67m	$y = 0.0071X^{-2.327}$	$R^2 = 0.94$
下拱型 固床工	1.82m	$y = 0.0002X^{-1.893}$	$R^2 = 0.89$
	1.1m	$y = 0.0014X^{-1.915}$	$R^2 = 0.91$
	0.82m	$y = 0.0028X^{-1.838}$	$R^2 = 0.96$
	0.67m	$y = 0.0028X^{-1.655}$	$R^2 = 0.96$

第三章 現地資料蒐集

本團隊於預期成果(二)、(三)中內容將在本章說明，其中水文分析、資料建置等會以梗枋南勢溪做為本章計算及建置示範樣區，而後續其餘兩樣區水仙溪與大溪溪計算與建置步驟相同。本章第一節將先蒐集三樣區文獻資料介紹選定之三樣區－宜蘭縣頭城鎮梗枋南勢溪、新北市水仙溪、宜蘭縣頭城鎮大溪里大溪溪，接著將以梗枋南勢溪為例，說明如何進行集水區水文分析與地形資料與建置。

第一節 現地工程資料蒐集

一、宜蘭縣頭城鎮梗枋南勢溪

根據行政院農業委員會水土保持局資料，梗枋南勢溪位於宜蘭縣頭城鎮，梗枋南溪為梗枋南溪支流流域，其中涵蓋之集水區面積約 73 公頃如圖 3-1，上下游河川平均坡度為 12%。集水區內地質分部主要為沖積層及乾溝層，上游為硬頁岩夾薄至厚層砂岩而下游則由礫石、砂及粘土所組成。計畫區梗枋南溪支流為土石流潛勢溪流，位於更新里上游，年平均降雨量約 2,828mm，而由於時常經溪水沖蝕，導致邊坡坍塌及未整治下游段溪水溢流，對更新里休閒農業造成嚴重影響，在 97 年之辛樂克颱風導致支流上游崩塌，洪水挾帶砂石大量下移，淤積河道，部份原有之土堤護岸被沖毀，危及兩岸居民及田園之安全。



資料來源:行政院農業委員會水土保持局

圖 3-1 梗枋南勢溪集水區圖

透過梗枋南勢溪下游野溪補強工程，可以得知梗枋南勢溪位於宜蘭縣頭城鎮，梗枋南勢溪下游野溪補強工程位置的 TWD97 座標為 (337077, 2755405)，工程內容為固床工 4 座、既有構造補強 5 座，因此選定此處為計劃樣區。



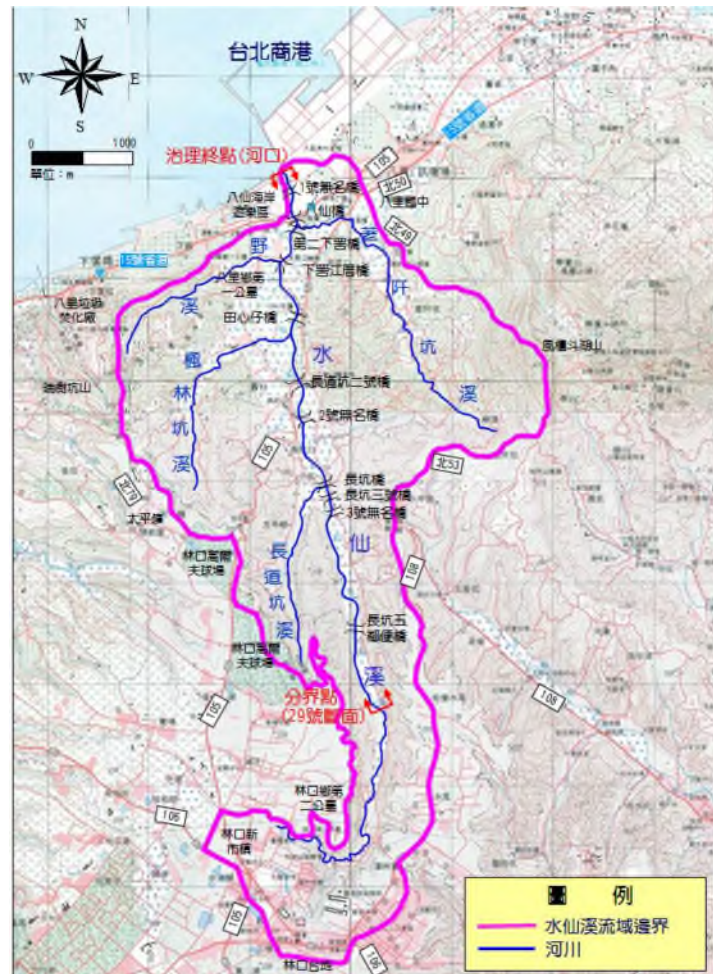
資料來源:行政院農業委員會水土保持局

圖 3-2 梗枋南勢溪固床工現況圖

梗枋南勢溪其餘水理計算資訊與後續地形資料介紹將於第三章節、第四章節做為示範樣區詳細再做介紹。

二、新北市水仙溪

根據民國 100 年 1 月新北市政府縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，水仙溪流域涵蓋新北市八里區及林口區，主流獨立排入臺灣海峽，長度約 8.88km，流域面積約 15.48km²。水仙溪流域大部份為丘陵地，河幅寬度變化不大，屬於野溪型河川。流域內每遇豪雨，護岸沖毀，低窪地區泛濫成災，且河床沖淤失衡導致既有護岸基腳淘空、固床工基礎裸露、上游河床沖刷及下游河床淤積等問題，亟需提出整體性治理對策，以有效整治水仙溪及減輕後續維護管理之負荷。為確保水仙溪防洪排水機能，擬以綜合治水對策，採自然工法穩定河道，配合維護管理，並將環境營造建立在生活、生態與休憩的基礎上，藉由了解土地使用、歷史風土、相關計畫與自然環境特質等內涵，在人文發展與生態回復的模式下進行規劃，具體完成河川治理及環境營造景觀綠美化等事項，朝多元化之河川空間規劃，確保永續發展。



資料來源:新北市政府縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告

圖 3-3 水仙溪流域範圍

根據其河床質採樣分析結果顯示，長道坑二號橋以下河段之平均粒徑與中值粒徑均較民國 90 年時有粗化之現象，顯示民國 90 年至民國 97 年間，該段河床可能有冲刷現象；平均而言，歷年來河床質縱向變化仍然維持礫石及卵石河床。且水仙溪因護岸及堤防之興設，流路已漸趨穩定，少部分因護岸崩塌而使流路變遷，下游段自下罟江厝橋以下，護岸多以 PC 護岸或 RC 護岸保護，流路穩定；中游段無堤防段流路變化較大；上游段河床波降較陡，流路較為穩定。

而水仙溪應屬彎曲河道型態，而長道坑溪匯流點以上河段，河床會有輕微流路分歧之現象，其深水河槽型態依經驗公式屬懸移載及混

合載河槽類型，現況平均寬深比為 30.63，平均深槽比為 1.49。整體而言，水仙溪屬中度深切型河槽，深水河槽易受水流沖蝕，進而橫向侵蝕造成護岸基礎流失，此為水仙溪每逢暴雨皆有多處護岸崩塌成因之一。經比較民國 90 年及本次(民國 97 年)斷面測量資料，深水河槽呈現沖刷現象，可能為該段期間相繼興建堤防束縮河道，導致水流速度增加而造成沖刷，或為人為外力因素如採砂行為介入，使河床下降；整體而言，水仙溪之流路已漸穩定，但河槽型態與河床沖淤仍處於持續調整變化過程中，尚未達穩定狀態。

關於水仙溪之綜合治水政策，係以綜合治水研擬整體改善策略，因地制宜、配合工程與非工程措施，達市管河川 25 年重現期保護標準及 50 年重現期洪水位不溢堤之保護標準下進行，水仙溪現有洪災問題包括下游段跨河構造物高度不足致壅高水位，第二下罟橋周邊河道窄縮造成通水斷面不足，以及河床淤積；中游段河床沖淤失衡，防洪構造物老舊破損，尚未築堤保護河段兩側土地洪水淘刷流失，以及水質遭受污染等問題。加上，流域現況有一處較大規模之崩塌地，位於長坑五鄰便橋上游約 1,850m 處，崩塌地範圍約有 150m 寬，50m 高，地質屬紅壤夾有粒徑 30~50mm 礫石，崩落之土石直接堆積河道。流域內土石流潛勢溪流，皆位於紅水仙溪中游段長道坑溪匯流口附近計有 8 條。

故於民國 100 年經綜合治水分析後，採既有護岸或堤防整建，並依水道治理計畫線修建，已築堤河段出水高不足者則加高加強。為達預期防洪目標，依擬定之水道治理計畫線，於需保護河段佈置防洪工程，包含堤岸改善工程、跨河構造物改善工程等，並採用分期分區計畫實施。

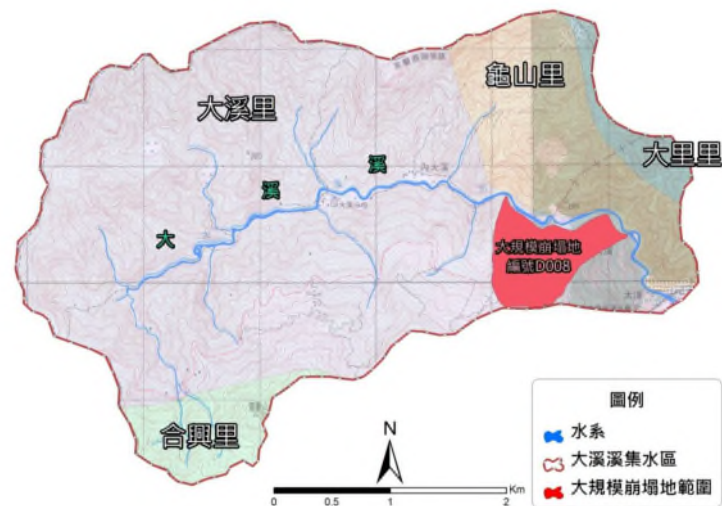


資料來源:行政院農業委員會水土保持局臺北分局

圖 3-4 水仙溪治理工程完工圖

三、宜蘭縣頭城鎮大溪里大溪溪

根據行政院農業委員會水土保持局台北分局頭城沿海等集水區(宜蘭縣-頭城鎮-D008)大規模土砂收支模式及觀測站評估報告，大溪溪集水區位於宜蘭縣頭城鎮大溪里，屬頭城沿海河系，位於頭城鎮及頭城沿海河系北端，集水區面積約 1,466 公頃，集水區範圍內包含大溪溪水系及中央地質調查所 104 年公布之大規模崩塌地一處。依據水土保持技術規範之坡度分類，大溪溪集水區坡度小於 30%之緩坡地約 14.59%，坡度 30~55%之中坡地約 48.75%，大於 55%之陡坡地約 36.67%，故大溪溪集水區以中坡地為主，坡度分級以六級坡居多，在坡向分布上，依據地形高程萃取之資料，大溪溪集水區坡向分布以北向分布最多，約佔全區面積之 17.57%，其次為南向，約 15.37%。



資料來源:行政院農業委員會水土保持局臺北分局

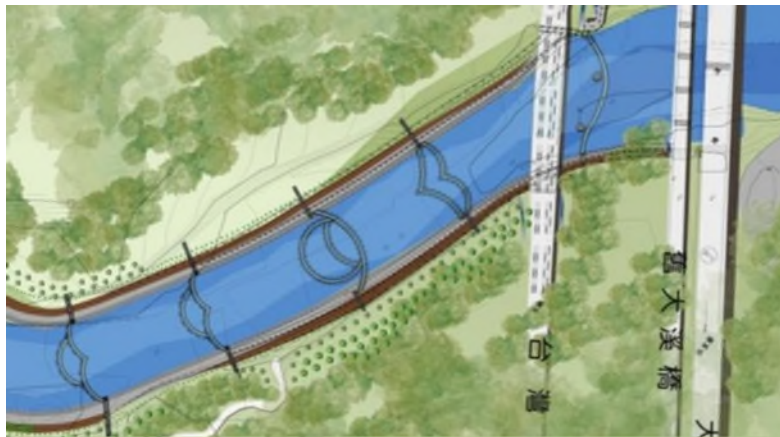
圖 3-5 大溪溪集水區示意圖

在河床質調查分析部分，根據民國 106 年頭城沿海等集水區(宜蘭縣-頭城鎮-D008)大規模土砂收支模式及觀測站評估計畫，大溪溪 5 個採樣點之野外粗顆粒分析及細粒徑分析成果，樣坑大溪溪 1 之平均粒徑約為 82.18mm，砂質含量約 35.9%，樣坑大溪溪 2 之平均粒徑約為 134.86mm，砂質含量約 17.6%，樣坑大溪溪 3 之平均粒徑約為 140.72mm，砂質含量約 13.1%，樣坑大溪溪 4 之平均粒徑約為 110.82mm，砂質含量約 21.7%，樣坑大溪溪 5 之平均粒徑約為 112.2mm，砂質含量約 19.1%。整體調查成果顯示，大溪溪因河道工程整治，河床整理影響，粒徑變動差異性大，後續於河床質變化探討中，將與歷年採樣成果配合降雨事件進行探討。

接著，根據民國 106 年頭城沿海等集水區(宜蘭縣-頭城鎮-D008)大規模土砂收支模式及觀測站評估計畫，其蒐集了臺北分局或其他機關(如林務局農林航空測量所、內政部地政司、中央地質調查所等)於大溪溪集水區及碼崙溪集水區內已辦理之空載光達之數值高程模型、航空照片、衛星影像等資料之調查工作，並由臺北分局協助行文取得

相關數化成果資料，成果資料需包含集水區上游崩塌情形、河道擴張或侵蝕、以及下游堆積情形等周遭環境狀態。

本計畫亦蒐集了已構築之固床工現地布置資料，包括設計圖，上下游邊界流速，土壤性質等以此參考。行政院農業委員會水土保持局台北分局所執行之大溪溪鐵路橋上游治理二期工程因其坡腳沖刷邊坡造成崩塌，危害了鐵路橋及臺 2 線安全亦因河道嚴重淤積影響通水斷面，因此辦理此項工程。此系列工程共施作了多元固床工工程六座，其工程配置圖如下圖 3-6、圖 3-7 所示。



資料來源:行政院農業委員會水土保持局臺北分局

圖 3-6 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程示意圖



資料來源:行政院農業委員會水土保持局臺北分局

圖 3-7 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程完工現況圖

第二節 集水區水文分析

一、單位歷線

在逕流量的計算中，有三種較常用之公式：

(一) 合理化公式

(二) 修正三角形單位歷線法

(三) 經驗公式

三種之中以經驗公式最為簡便，推算逕流時間快速，但會因不同地域地勢、坡度、土壤性質等等而會有差異，如果只需要觀察洪峰流量的話，使用合理化公式較修正三角形單位歷線為方便快捷，但如果想觀察由降雨量轉至洪水間的流量過程變化，則會使用修正三角形單位歷線法，本團隊欲計算完整降雨-逕流過程，因此選定修正三角形單位歷線法做為計算公式模擬梗枋南勢溪完整降雨-逕流過程。

修正三角形單位歷線根據行政院農委會水土保持局水保手冊(2017)上記載，假設集水區流量歷線呈三角形分布，具有固定基期，洪峰流量與降雨量成正比，如圖 3-8 所示，由三角形面積可得

$$Q_p = \frac{2QA}{T_p + T_r}$$

式中， Q_p =洪峰流量； Q =總逕流水深； A =集水區面積； T_p =歷線開始至到達洪峰流量時間； T_r =到達洪峰流量時間至歷線終端； T_b =歷線時間基期(= $T_p + T_r$)。當總逕流水深(Q)等於單位有效降雨深度(R_e)(一般取 10mm)，則上式稱之為三角形單位歷線(triangular unit hydrograph)。

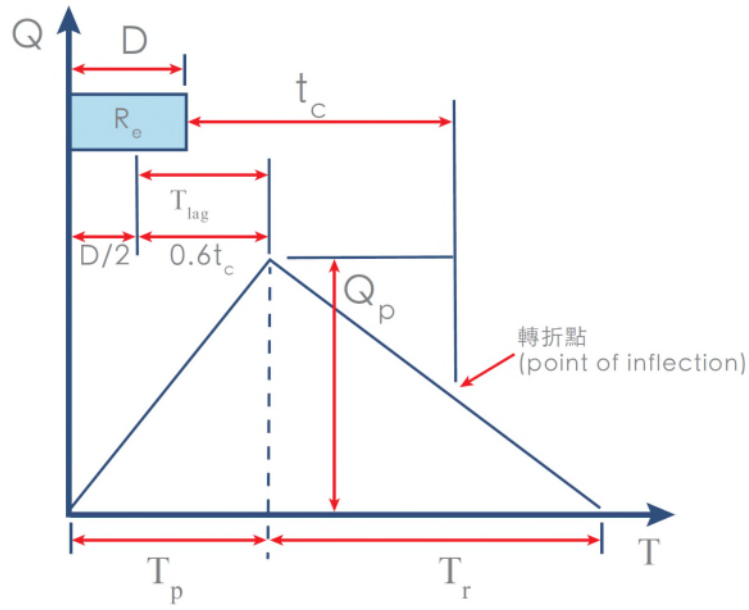


圖 3-8 修正三角形單位歷線圖

其中

$$T_p = \frac{D}{2} + T_{lag}$$

式中， D =有效降雨延時(hr)， $D \leq 0.133t_c$ ； T_{lag} =稽延時間(hr)，表有效降雨中心至洪峰流量到達時間，可表為(Mockus 1957; Simas 1996)

$$T_{lag} = 0.6t_c$$

式中， t_c =集流時間(hr)，可依前述集流時間相關公式推求之。設 $T_r = mT_p$ ，且 Mockus(1957)提出， $m=1.67$ ，則三角形單位歷線洪峰流量及洪峰流量到達時間可分別表示為

$$Q_p = \frac{0.208 \cdot A \cdot R_e}{T_p}$$

$$T_p = \frac{D}{2} + 0.6t_c$$

式中， Q_p =洪峰流量(cms)； R_e =單位有效降雨深度(mm)； A =集水區面積(km^2)； T_p =歷線開始至到達洪峰流量時間(hr)。

本研究之水文分析參考梗枋南勢溪下游野溪補強工程(2014)中水文基本資料如表 3-1 進行計算：

表 3-1 梗枋南勢溪水文基本資料

集水面積 A	830.2 公頃
山坡長度 l_1	300 m
溪流長度 l_2	4083.9 m
高 差 ΔH	199.8 m
流入速度(坡面逕流流速) v_1 依水土保持技術規範建議採用 0.3 至 0.6(m/s) $v_1 = \frac{l_1}{v_1} = 0.5 \text{ m/s}$	
流下速度(河道逕流流速) v_2 依照 Rziha 公式 $v_2 = \left(\frac{\Delta H}{L}\right)^{0.6}$ $v_2 = 20 \left(\frac{199.8}{4083.9}\right)^{0.6} = 3.27 \text{ (m/s)}$	
坡面逕流時間 $t_1 = (300/0.5) = 600\text{s} = 10 \text{ min}$	
河道逕流時間 $t_2 = (4083.9 / 3.27) = 1248.899 \text{ s} = 20.81 \text{ min}$	
集流時間 $T_c = t_1 + t_2 = 30.81 \text{ min}$	

修正三角形單位歷線之基期 T_b 、洪峰流量 Q_p 及到達洪峰時間 T_p 與地文因子關係為：

$$Q_p = \frac{0.208 \cdot A \cdot Re}{tp} = 13.714 \text{ cms}$$

$$T_p = 0.5D + T_l = 0.5D + 0.6T_c = 0.349766667 \approx 0.35 \text{ hr}$$

$$T_b = 2.67 T_p = 0.933877 \text{ hr}$$

表 3-2 有效降雨延時推估

集流時間	$D \leq 0.133t_c$	採用值
$t_c \geq 6 \text{ hr}$	$>48 \text{ min}$	60
$5.0 \leq t_c < 6.0 \text{ hr}$	$40 \leq D < 48 \text{ min}$	50
$4.0 \leq t_c < 5.0 \text{ hr}$	$32 \leq D < 40 \text{ min}$	40
$3.0 \leq t_c < 4.0 \text{ hr}$	$24 \leq D < 32 \text{ min}$	30
$2.0 \leq t_c < 3.0 \text{ hr}$	$16 \leq D < 24 \text{ min}$	20
$1.0 \leq t_c < 2.0 \text{ hr}$	$8 \leq D < 16 \text{ min}$	10
$t_c < 1.0 \text{ hr}$	$D < 8 \text{ min}$	5

$D \leq 0.133T_c = 4.26 \text{ min}$ 依水土保持手冊 $D < 5 \text{ min}$ 取 $5 \text{ min} = 1/12$

hr

其中：

Q_p ：洪峰流量(立方公尺/秒)

A ：流域面積(平方公里)

R_e ：單位有效雨量(毫米) 取 10mm

T_p ：開始漲水至洪峰流量發生時間(小時)

D ：單位降雨延時(小時)

T_b ：歷線基期

依照上述修正三角形單位歷線參數 Q_p 、 T_p 、 T_b 等數值繪出單位歷

線如圖 3-9。

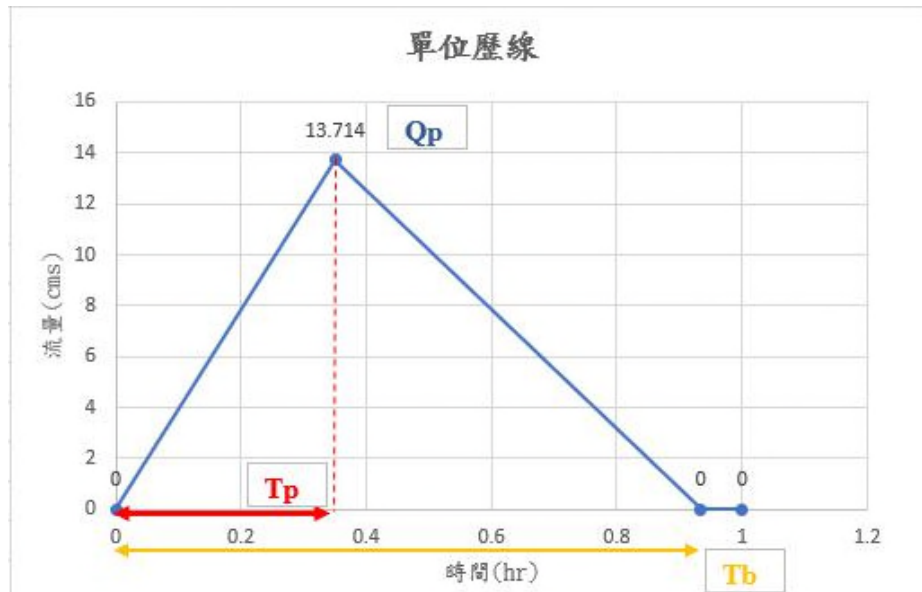


圖 3-9 修正三角形單位歷線 1

由於設計單位歷線時單位降雨延時 D 採取 $1/12$ 小時，因此將 X 軸以時距每 $1/12\text{hr}$ 繪製出單位歷線如圖 3-10。

時間	$U(1/12, t)$
0.00	0.00
0.08	3.26
0.17	6.53
0.25	9.81
0.33	13.08
0.35	13.71
0.42	12.15
0.50	10.19
0.58	8.23
0.67	6.27
0.75	4.32
0.83	2.36
0.92	0.40
0.93	0.00

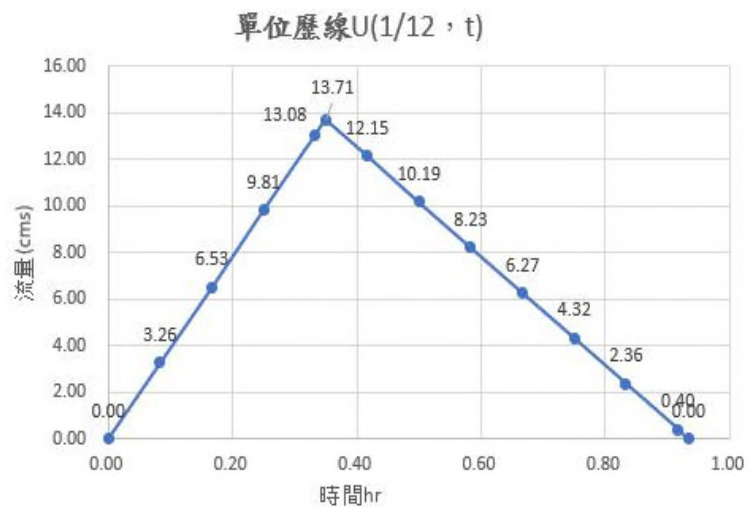


圖 3-10 修正三角形單位歷線 2

二、設計雨型

雨型是指在降雨期間雨量分布情形，由降雨強度-延時-頻率曲線 (IDF) 上所推求之降雨量是在特定的降雨延時內之平均降雨量，因此

若想將降雨總量分配至想製作之降雨延時時必須設計雨型，本團隊將採取目前最廣泛應用的交替組體法進行雨型設計。

交替組體法又稱為交替區塊法或是降雨強度法，是利用降雨強度-延時-頻率曲線(IDF)所發展而成的設計雨型方法，其步設計驟如下：

(一) 將計算所得之降雨延時 T_c 分成 n 個阻體，每個組體中的時間間距 Δt 依照降雨量資料間距可以自行設計，本研究因單位歷線所採用之單位降雨延時 D 採用 1/12 小時(五分鐘)，故在組體時間間距採也用五分鐘，方便於後續流量歷線疊合，本研究將情境模擬調整前後連續 24hr 降雨之情況，而總降雨延時 $24\text{hr} = n \times \Delta t$ ，其中 $\Delta t = 5\text{ min}$ ，故 n 等於 288，共有 288 組。

(二) 本研究利用二組重現期距作為水文分析的基本資料，第一組為 2 年重現期距之降雨量；第二組為 50 年重現期距之降雨量，2 年重現期距之選用為觀察日常暴雨後之河況情形，而 50 年重現期距之選用，是依照台灣水土保持局之規範，將檢測調整後固床工之功能性，是否造成附近居民安全之疑慮。

(三) 選取好重現期距後，利用水保技術規範第十六條，降雨強度之推估值，不得小於下列無因次降雨強度公式之推估值，下列之年平均降雨量，應採計畫區就近之氣象站資料，因此本研究採取梗枋南勢溪最近之雨量站：中央氣象局-頭城雨量站做為設計之依據，計算過程如下表 3-3。

表 3-3 梗枋南勢溪之降雨強度公式計算

梗枋溪年平均雨量 P 採用中央氣象局-頭城雨量站 其年平均降雨量 $P = 2598.0$ 公釐		
無因次降雨 強度參數	水保技術規範公式	參數值
A	$A = (\frac{P}{-189.96 + 0.31P})^2$	17.821
B	$B = 55$	55
C	$C = (\frac{P}{-381.71 + 1.45P})^2$	0.589
G	$G = (\frac{P}{42.89 + 1.33P})^2$	0.552
H	$H = (\frac{P}{-65.33 + 1.836P})^2$	0.305
I_{60}^{25}	$I_{60}^{25} = (\frac{P}{25.29 + 0.094P})^2$	92.93
$I_t^T = (G + H \log T) \frac{A}{(t + B)^C} I_{60}^{25}$		

表 3-3 中，

T：重現期距(年)

t：降雨延時或集流時間(分)

P：年平均降雨量(公釐)

A、B、C、G、H：係數

I_{60}^{25} ：重現期距 25 年，降雨延時，60 分鐘之降雨強度(公釐/小時)

I_t^T ：重現期距 T 年，降雨延時 t 分鐘之降雨強度(公釐/小時)

1. 由降雨強度公式分別計算延時為 Δt ， $2\Delta t$ ， $3\Delta t$，至總降雨延時 24hr 之降雨強度，並將降雨強度換算為該對應之總降雨深度。
2. 為了推求每個時間間距之降雨增量，將後五分鐘累積雨量減去前五分鐘累積雨量，得出每五分鐘之降雨量，單位為 mm。
3. 將最大之雨量放置於延時中間，接著依次將次等大雨量擺置最大之雨量兩邊，依序排列，最後得出該地區 24 小時之設計雨型。
4. 將設計出之雨型變換為百分比，並參考水文設計應用手冊(2001)中 20 年及 50 年重現期距 24 小時梗訪南勢溪總降雨深度，以總降雨深度相乘對所做出之雨型做修正，最終得出設計之 2 年與 50 年之重現期距雨型。

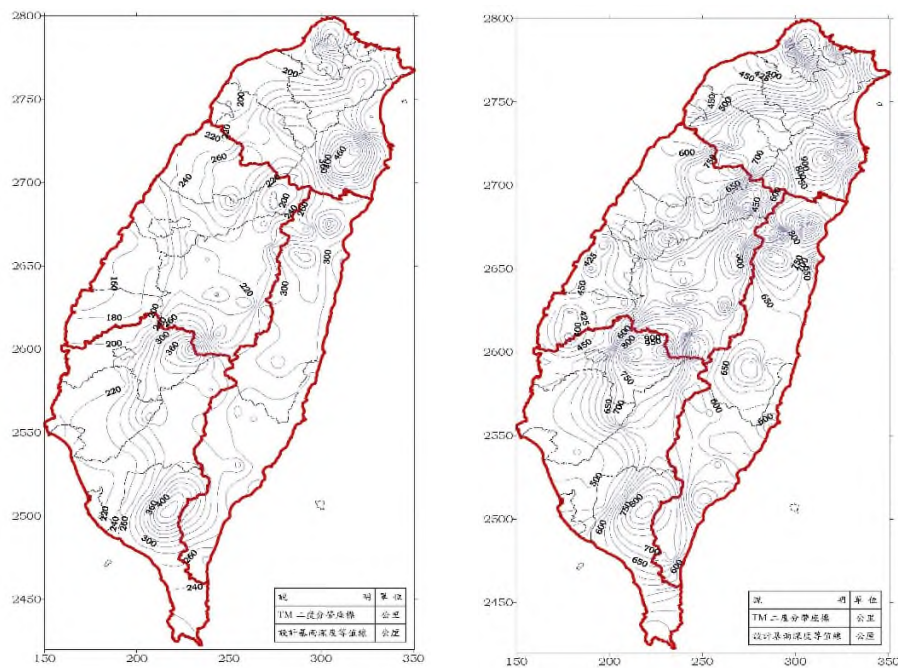


圖 3-11 水文設計應用手冊總降雨深度
(左圖為 2 年重現期，右圖為 50 年重現期距)

5. 由於水文設計應用手冊中依統計意義計算之重現期距為從 2 年開始，總共分為 2 年、5 年、10 年、25 年、50 年、100 年、200 年等七組重現期距，因此本研究將此七組之 24 小時降雨延時做指數外插，將設計之枯水期重現期距所對應之總降雨深度算出，並可將設計之枯水期雨型進行修正。

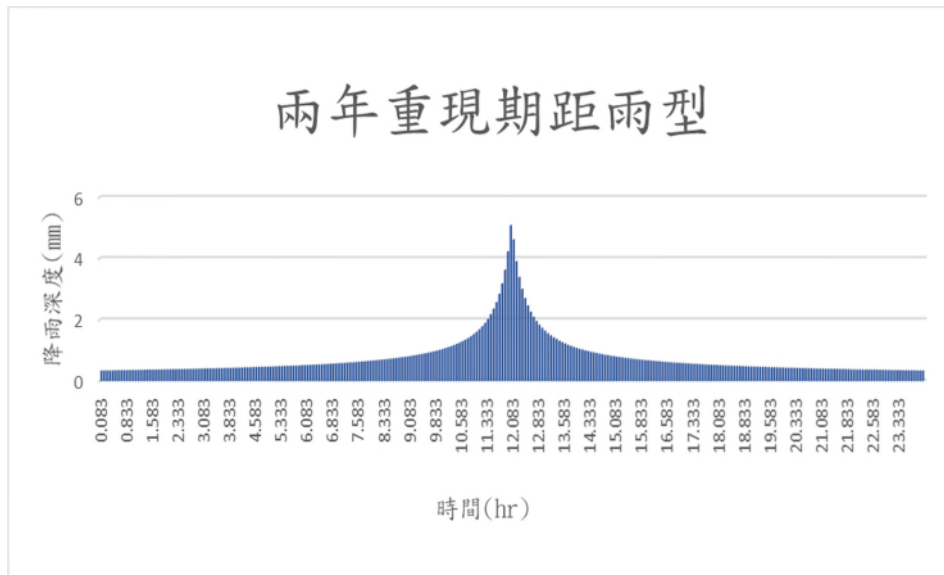


圖 3-12 2 年重現期距雨型

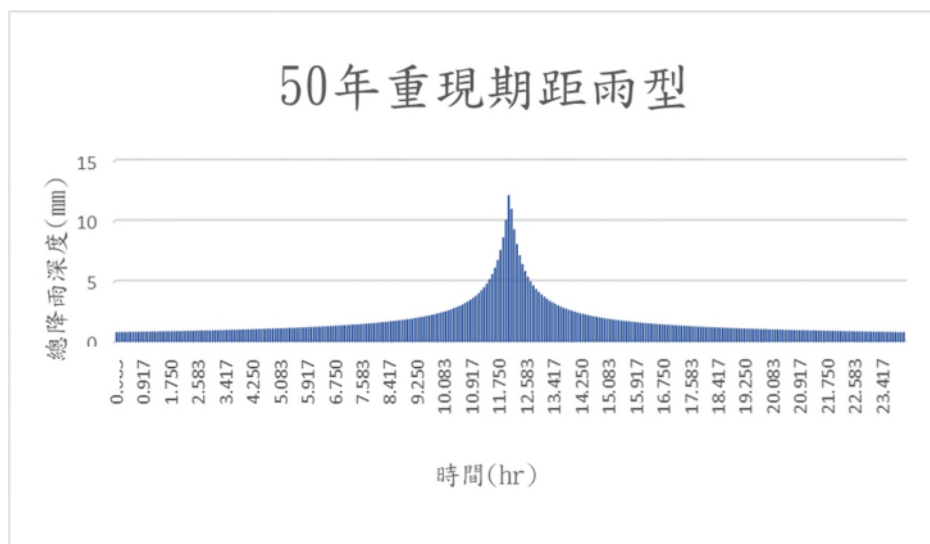


圖 3-13 50 年重現期距雨型

三、逕流歷線

台灣本島的分水嶺主要偏東，故河川東短西長，因南部的冬夏季雨量較為不平均，南部在冬季時經常因降雨量過少造成枯水期，常形成「野溪」，北部河川則較多常流水河川。而又因台灣面積不大，一般而言台灣北部河川特性大致相同，故此計畫將以梗枋南勢溪作為主要研究樣區，水仙溪以及大溪溪則配合梗枋南勢溪進行計算，以求得其水文資料進行分析與研究。

(一) 梗枋南勢溪

有了單位歷線雨和雨型後，先將雨型扣除降雨損失 2 mm，其中降雨損失是依照水土保持手冊中建議扣除 2-4 mm，為了以安全性推斷因此採較小之 2 mm，接著可將單位歷線依照所設計之雨型以線性正比之方式利用 code 進行疊和，最後再加上河川基流量，但本研究於 109 年 1 月 22 日所勘發現梗枋南勢溪河床 23 號至 12 號固床工裸露皆為伏流水，因此為了檢視調整固床工後枯水期之棲地適合度，將不考慮河川基流量，疊和完成後即可得梗枋南勢溪上游之 2 年、50 年重現期距不同情況之河川洪水流量歷線。

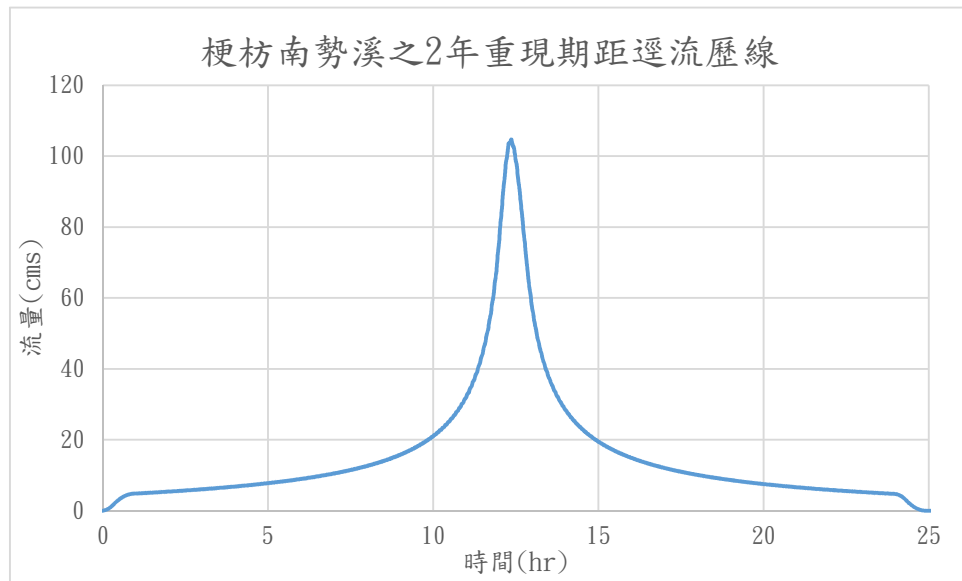


圖 3-14 梗枋南勢溪 2 年重現期距逕流歷線

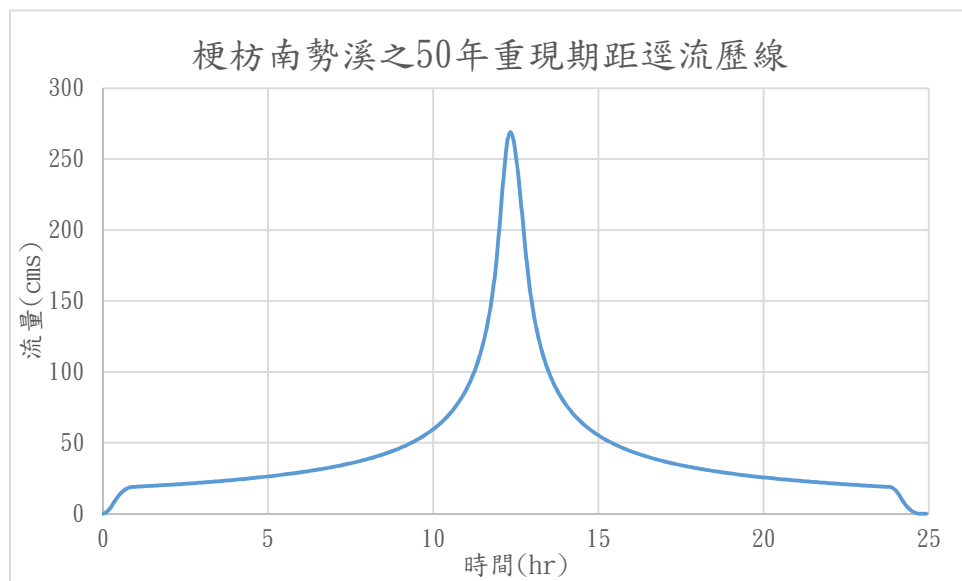


圖 3-15 梗枋南勢溪 50 年重現期距逕流歷線

(二) 水仙溪

根據民國 100 年 1 月新北市政府縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，水仙溪由林口台地竹林山觀音寺景觀滯洪池發源向北流入台北商港，流域面積 15.48km²，主流長度約 8.88km，集流時間不到一日，為使推估之洪峰流量符合實際狀況，水文分析採一

日最大暴雨資料，分析各重現期洪峰流量，以求得以下水仙溪 2 年與 50 年重現期距逕流歷線，如圖 3-16、圖 3-17 所示。

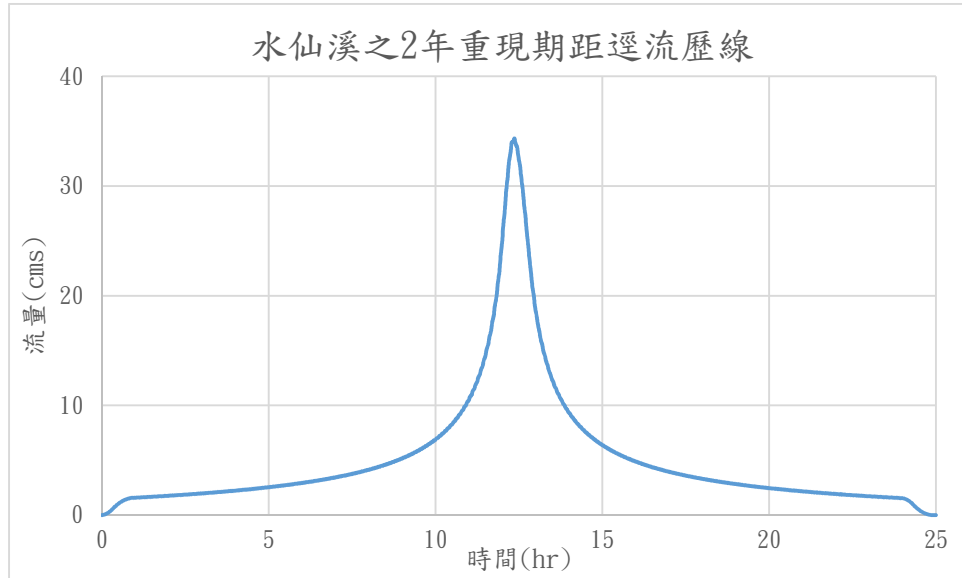


圖 3-16 水仙溪之 2 年重現期距逕流歷線

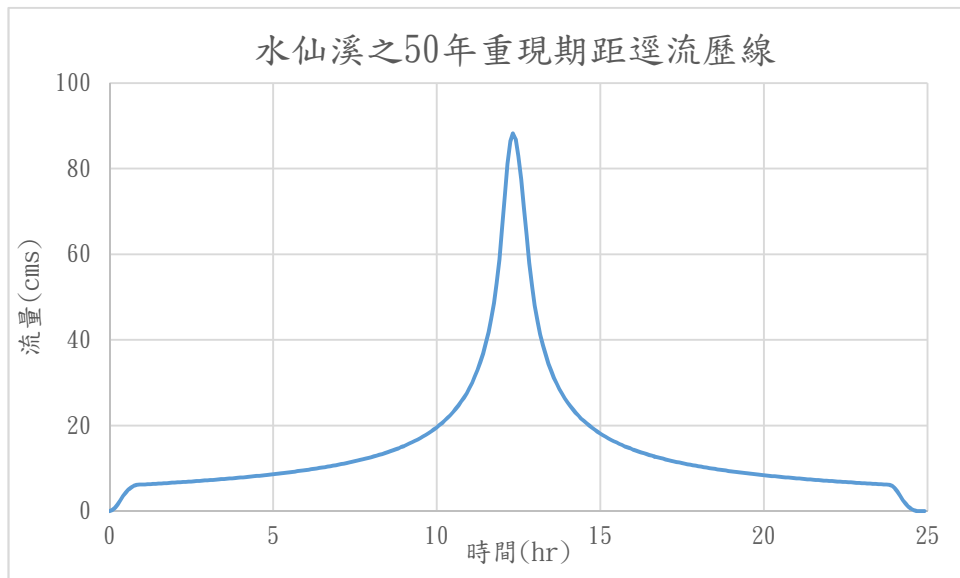


圖 3-17 水仙溪之 50 年重現期距逕流歷線

(三) 大溪溪

根據行政院農業委員會水土保持局台北分局頭城沿海等集水區(宜蘭縣-頭城鎮-D008)大規模土砂收支模式及觀測站評估報告，大溪溪集水區位處頭城沿海河系北端，集水區範圍內包含大

溪溪水系，大溪溪又名東澳北溪，屬縣管河川，幹流長度約 8 公里，並彙整鄰近各雨量站資料測站之最大日雨量(mm)及一日暴雨頻率年等相關資料，分析各重現期洪峰流量，以求得以下水仙溪 2 年與 50 年重現期距逕流歷線，如圖 3-18、圖 3-19 所示。

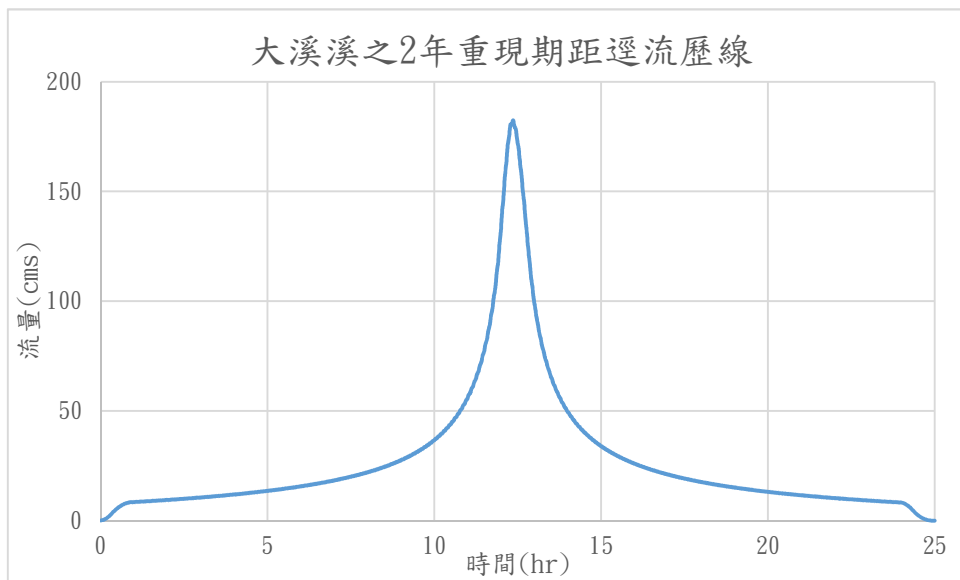


圖 3-18 大溪溪之 2 年重現期距逕流歷線

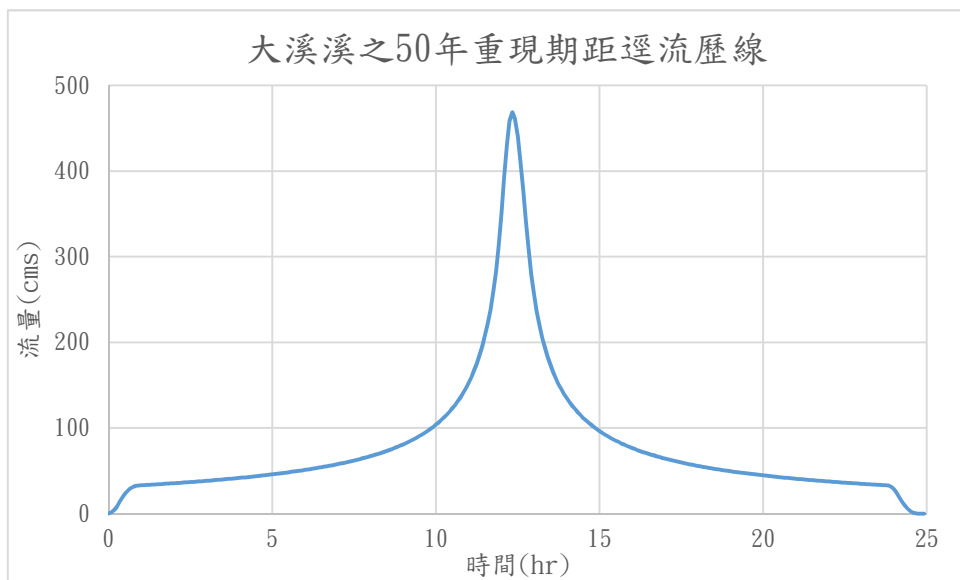


圖 3-19 大溪溪之 50 年重現期距逕流歷線

第四章 數值模擬輸砂性質

本團隊於預期成果(四)中內容將在本章說明，其中模擬參數設定、敏感度分析和輸砂公式分析等等會以梗枋南勢溪做為本章模擬前置設置示範樣區，而後續其餘兩樣區水仙溪與大溪溪模擬前置步驟相同，將不再一一重複各別設置過程，會直接呈現最後結果及分析內容。

第一節 RiverFlow 2D 模式介紹

一、模式發展

RiverFlow2D 發展於 1981 年，是一款最先進的融合水力學、水文學彈性網格的二維仿真計算軟體，軟體中最早模擬淺水流方程式，採用 Fortran 語法和 MacCormack 有限差分法(MacCormack Finite Difference Scheme)，其功能和模型計算能力獲得美聯邦公路局 (FHWA) 的認可。在洪水、泥石流、滑坡、河流、港灣等工程中用於快速、精準的體積守恆計算，提供高性能的有限體積引擎。RiverFlow 2D 可以解決最苛刻的洪水建模情況，例如在初始乾燥地形上的潰壩和潰堤仿真計算，在水利、交通、地質工程上都有著普遍應用，RiverFlow 2D 最大特點是其使用 GPU 去做演算，不但可以提高效率、還可以大幅減少了模擬時間，對災害預測防治有更一進步的貢獻。

RiverFlow 2D 最早發行版本為 RiverFLO-2D (FE) v2009，是由 Flo-2D 軟體公司於 2009 年 9 月發行，此版本為 Flo-2D 的進階版本，原本的 FLO-2D 應用於大範圍洪水災害模擬，觀察大面積洪水路徑走

向，為了能進一步進行小範圍細部模擬，因此 Flo-2D 軟體公司開發了 RiverFlo-2D 進行小範圍更詳盡的洪水預測，除了洪水預測外，更研發了許多功能例如穩流模擬，同時還加入了複雜的時變流與亞臨界、超臨界流不同的模擬，在模擬水工構造物部分也加入了不同類型構造物以供選擇，最重要的在輸砂部分，它也提供了混合粒徑與定床和動床的輸砂模組。

而 RiverFlow 2D 中的二維水理輸砂模組 RiverFlow-2D ST(Sediment Transport) module，在輸砂模組控制方程式相當嚴謹，同時考慮懸浮載與底床載運移程式，可針對區域沖淤情勢評估、防砂工程方案評估、探討底床的變化，其中 RiverFlow2D 軟體的優勢在於考慮懸浮載的公式多，且可以單獨模擬純懸浮載運移的情況，也可以考慮純底床載的運移情況，再加上考慮底床載的公式較多，可依不同公式適用範圍去做適當調整，在國外已經有許多應用案例，國外文獻中 Segura-Beltran, F.(2016)，使用 RiverFlow 2D 針對西班牙赫羅納河（Girona River）山洪暴發進行了模擬分析，在 Echeverribar, I.(2017) 也提到，使用了 Riverflow 2D 對埃布羅河中游進行模擬，以達到緩解洪災的效果，目前模式發展已經成熟，已有多處機構與研究都在使用中。

二、 模式理論與輸砂模組

(一) 水流控制方程式

RiverFlow 2D 模式使用的淺水流方程式可以使用質量平均深度與動量守恆方程式進行相關假設，用數學型式以偏微分方程可以表示如下：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U, x, y)$$

其中， $U = (h, q_x, q_y)^T$ 是守恒變數之向量表示， h 為水深， $q_x = uh$ 、 $q_y = vh$ 代表單寬流量， (u, v) 為沿著 (x, y) 坐標的速度向量平均深度分量，因此方程式通量向量可表示為下列所示：

$$F = (q_x, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h})^T$$

$$G = (q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2)^T$$

式中， g 是重力的加速度， $\frac{1}{2}gh^2$ 為假設分佈之靜水壓力所產生，常見應用於淺水方程，並以向量方式 S 表示底床正向壓力和底床剪應

力：

$$S(0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy}))^T$$

式中， z_b 為底床高程

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y}$$

接著，底床摩擦損失以曼寧粗糙係數 n 表示為：

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}$$

(二) 數值模擬方程式

RiverFlow2D 模式使用有限體積法近似黎曼解，由水流方程式理論中提到，可將水流方程式以張量型式表示為：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U, x, y)$$

$$\mathbf{F} = \left(q_x, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h} \right)^T, \quad \mathbf{G} = \left(q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \right)^T$$

為了採用有限體積算法，因此將上述之公式對網格單元或體積積分，並以高斯定理將其表示為：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \mathbf{E} n d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega$$

式中， $\mathbf{E} = (\mathbf{F}, \mathbf{G})$ 和 $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ 是體積 Ω 的向外單位法向量，為了獲得上述之高斯表示法的數值解，將值域劃分為多個計算單元 Ω_i ， U_i 表示為固定時間間格下守恒變量之各單元平均值，並使用固定之網格並假設守恒變量分量使用分段表示如圖 4-1，各單元參數如圖 4-2、圖 4-3 表示，並將上式改寫為：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \sum_{k=1}^{NE} (En - \bar{S})_k l_k = 0$$

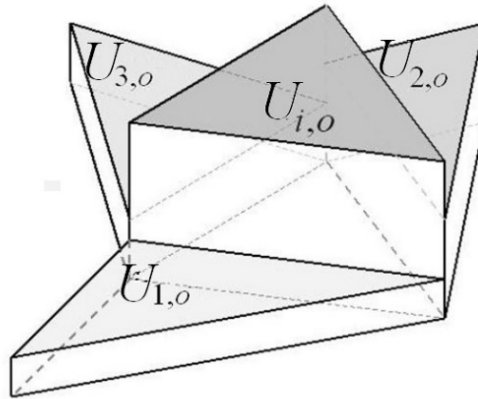


圖 4-1 固定之網格分量示意圖

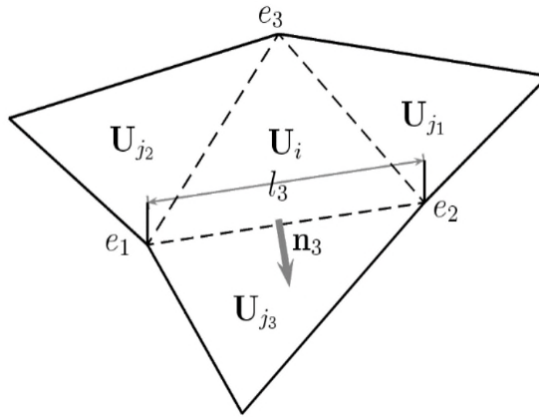


圖 4-2 各單元參數示意圖 1

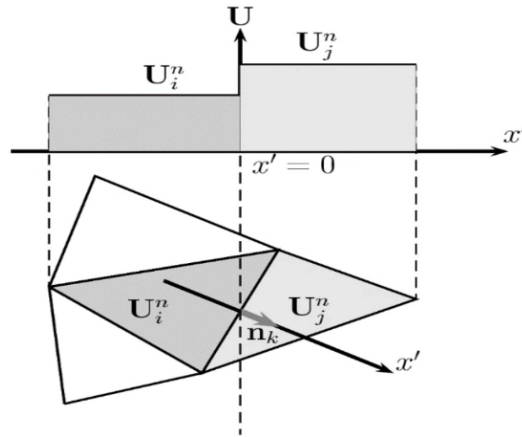


圖 4-3 單元參數示意圖 2

接著近似解可以利用 Jacobian 矩陣 $\tilde{J}_{n,k}$ (Roe 1981)，用非線性法向通量 $\mathbf{En}$ 的和兩個近似矩陣 $\tilde{\mathbf{P}} = (\tilde{\mathbf{e}}^1, \tilde{\mathbf{e}}^2, \tilde{\mathbf{e}}^3)$ 和 $\tilde{\mathbf{P}}^{-1}$ 來表示近似解，使用 Jacobian 之特徵向量使其對角化：

$$\tilde{\mathbf{P}}_k^{-1} \tilde{J}_{n,k} \tilde{\mathbf{P}}_k = \tilde{\Lambda}_k$$

式中， $\tilde{\Lambda}_k$ 是特徵值為 $\tilde{\lambda}_k^m$ 的對角化矩陣

$$\tilde{\Lambda}_k = \begin{pmatrix} \tilde{\lambda}_k^1 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\lambda}_k^2 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\lambda}_k^3 \end{pmatrix}_k$$

在跨網格邊緣之向量 $\mathbf{U}$ 跟來源項之差值都會投影到矩陣特徵向量上

$$\delta U_k = \tilde{P}_k A_k \quad (\tilde{S})_k = \tilde{P}_k B$$

式中， $A_k = (\alpha^1, \alpha^2, \alpha^3)_k^T$ 包含了一組波強度而 $B = (\beta^1, \beta^2, \beta^3)_k^T$ 包含了一組來源強度，詳細細節可參考(Murillo & Garc'ia-Navarro 2010b)，在每項的完全現性化後，可將數值通量函數 $(En - \bar{S})_k$ 定義為下式：

$$(En - \bar{S})_k = E_i n_k + \sum_{m=1}^3 (\tilde{\lambda}^- \theta \alpha \tilde{e})_k^m$$

式中使用 $\tilde{\lambda}^- = \frac{1}{2}(\tilde{\lambda} - |\tilde{\lambda}|)$ 和 $\theta_k^m = \left(1 - \frac{\beta}{\tilde{\lambda}\alpha}\right)_k^m$ 代入下式中

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} \mathbf{U} d\Omega + \sum_{k=1}^{NE} (\mathbf{E}n)_k^\downarrow l_k = \int_{\Omega_i} \mathbf{S} d\Omega + \int_{\Omega_i} \mathbf{R} d\Omega$$

並使用 Godunov 方法 (Godunov 1959) 求解一階微分方程：

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \sum_{k=1}^{NE} \left[E_i n_k + \sum_{m=1}^3 (\tilde{\lambda} - \theta \alpha \tilde{e})_k^m \right] \frac{l_k}{A_i} \Delta t$$

當每個單元 i 在數量 E_i 內都是均勻的且在任何單元下都具有以下之幾何性質：

$$\sum_{k=1}^{NE} n_k l_k = 0$$

則可將公式改寫成：

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \sum_{k=1}^{NE} \left[\sum_{m=1}^3 (\tilde{\lambda} - \theta \alpha \tilde{e})_k^m \right] \frac{l_k}{A_i} \Delta t$$

其中有限體積法可以用波分裂公式寫成下式：

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \sum_{k=1}^{NE} \left(\delta M_{i,k}^- \right)^n \frac{l_k}{A_i} \Delta t$$

其中

$$\delta M_{i,k}^{-} = \sum_{m=1}^3 (\tilde{\lambda} - \theta \alpha \tilde{e})_k^m$$

在處理邊界條件時，使用上式之公式是非常有效的，同時也可以確保它是守恆狀態，在(Murillo & García-Navarro 2010b)中展示了如何以波分裂型式拆去推導出數值方法，域內每個像元邊緣計算的貢獻總量等於穿過域邊界的通量平衡，因此精確的證明了它的守恆。

(三) 輸砂模組理論

泥沙運輸這門學問重點在於如何去處理流水與泥沙顆粒之間的關係，儘管自 1950 年代開始對於泥沙運輸學就開始進行研究且在工程中也常廣泛應用 Nielsen(1992)、Julien(1998)，但目前泥沙運輸模擬模式仍然是水利研究領域中最活躍的主題之一。雖然在現實情況下數值模擬自由表面流底床運移包含瞬態流和可移動邊界，但常用之沿海與河流地形動力學分離了流體與泥沙侵蝕沉積作用 Cunge (1980)，其中忽略不穩定的流體動力效應意味著與流體動力相比，地形動力學變化的時間尺度更小，如果假設成立，則只能合理模擬緩慢變化的河床載準穩態過程，進而排除包含衝擊或不連續性的快速變化流量，因此 RiverFlow 2D 研發可以從緩慢變化之事件至快速變化之事件的精確模擬輸砂模組(Sediment Transport Model：ST)。

RiverFlow2D 模式輸砂模組理論中水、固態體積守恆源自於平均深度公式推導，其所使用之控制方程式可以偏微分型式表示為：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) + R(U)$$

式中

$$U = (h, q_x, q_y, h\phi_1, \dots, h\phi_N, z_b)^T$$

其中， U 為守恒變量， h 代表水深， $q_x = hu$ 和 $q_y = hv$ 為單寬流量， (u, v) 為沿著 x 與 y 坐標軸劃分為的速度向量分量， ϕ_p ，其中 $p=1, 2, \dots, N$ ，代表平均深度中不同種類泥砂之的濃度， z_b 為底床高程，當 $z_b = \sum_{p=1}^{N_p} z_p$ 時，就可能存在土壤成分不均一的情況，其中不同粒徑的土壤可能共存。

將上式以通量放式可以寫成：

$$F = (q_x, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h}, q_x \phi_1, \dots, q_x \phi_N, \sum_{p=1}^{N_p} \left(\frac{1}{1-P_p} q_{b_p, x} \right))^T$$

$$G = (q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, q_y \phi_1, \dots, q_y \phi_N, \sum_{p=1}^{N_p} \left(\frac{1}{1-P_p} q_{b_p, y} \right))^T$$

式中， g 是重力的加速度， P_p 是各類型底床土壤 p 的孔隙率， $q_{b_p, x}$ 和 $q_{b_p, y}$ 是透過經驗法則計算出每個土壤定向底床載輸送速率，並用 S 表是兩種底床力型式，一種為底床剪應力，另一種為底床正向壓力，表示如下：

$$S = (0, \frac{p_{b,x}}{\rho_w} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho_w}, \frac{p_{b,y}}{\rho_w} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho_w}, 0, \dots, 0, 0)^T$$

式中， $\tau_{b,x}$ ， $\tau_{b,y}$ 和 $p_{b,x}$ ， $p_{b,y}$ 分別為床剪應力和底床正向壓應力沿 (x, y) 坐標方向之分量， ρ_w 為水密度，底床正向壓力可以表示為底床 z_b 之坡度：

$$\frac{p_{b,x}}{\rho_w} = -gh \frac{\partial z}{\partial x} = ghS_{0x}, \quad \frac{p_{b,y}}{\rho_w} = -gh \frac{\partial z}{\partial y} = ghS_{0y}$$

將上式以曼寧粗糙係數 n 改寫為：

$$\frac{\tau_{b,x}}{\rho_w} = ghS_{fx}, \quad S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}},$$

$$\frac{\tau_{b,y}}{\rho_w} = ghS_{fy}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}$$

具有體積特徵反應的 R 項定義為

$$R = \left(\sum_{p=1}^N \frac{R_p}{1 - P_p}, 0, 0, R_1, \dots, R_N, \sum_{p=1}^N \frac{R_p}{1 - P_p} \right)^T$$

R_p 的沉降孔隙率考慮了床與流之間的固體體積交換通量，其計算公式為

$$R_p = \alpha_p \omega_{s,p} (\phi_p^* - \phi_p)$$

式中， ϕ_{*p} 定義為平衡懸浮濃度，由固體輸砂流量定律而得， ϕ_p 為泥沙懸浮載輸砂量，兩種濃度都考慮了 $w_{s,p}$ 沉降速度和 α_p 經驗修正因子，其代表了近床泥沙濃度和平均深度懸浮載濃度之間的差異。

(四) 底床載控制方程式與公式

當底床載是主要的泥砂輸送機制，且懸移質的影響可忽略不計時，底床載控制方程式可以簡化為：

質量守恆方程式

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

在 x 方向動量守恆方程式：

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial \left[hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right]}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = \frac{p_{bx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w}$$

在 y 方向動量守恆方程式：

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial\left[hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right]}{\partial y} = \frac{p_{by}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w}$$

底床泥砂 p 的高度變化：

$$\frac{\partial z_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{1 - P_p} q_{b_p, x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{1 - P_p} q_{b_p, y} \right) = 0$$

其中 P_p 是底床中各類型土壤成分的孔隙率， $q_{b_p, x}$ 和 $q_{b_p, y}$ 是單位時間和單位寬度下對應的泥砂體積通量，其可透過輸砂定律與公式算出。

模式中沉積物傳輸速率 p 分量， q_{b_p} ，定義為：

$$|q_{b_p}| = \sqrt{q_{b_p, x}^2 + q_{b_p, y}^2}$$

由 $z_b = \sum_{p=1}^N z_p$ 代入底床泥砂 p 的高度變化式中可以考慮可能擁有不同比例粒徑之混和土壤，為了考慮到這種非均質性，與每種泥砂粒徑相關的每個沉積物輸送流量 q_{b_p} 都受到其相應土壤分量的影響，底床載泥砂輸送可由愛因斯坦的無因次參數表示如下：

$$\Phi = \frac{|q_{b_p}|}{F_{b_p} \sqrt{g(s-1)d_{50}^2}}$$

其中 $s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ 是土壤與水之密度比， d_{50} 是泥砂中值粒徑， F_{b_p} 是底床泥砂 p 的分量。

表 4-1 彙整了在 RiverFlow2D 模式中之底床載輸砂公式，其中剪應力無因次參數 θ 可以表示為：

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}}$$

其中 τ_b 為底床邊界之剪應力。

表 4-1 Riverflow2D 底床載輸砂公式

輸砂公式	Φ	輸入參數
Meyer-Peter and Müller (1948)	$\Phi_b = \begin{cases} 8(\theta - \theta_{cr})^{\frac{3}{2}} & \theta \geq \theta_{cr} \\ 0 & \theta \leq \theta_{cr} \end{cases}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Ashida and Michiue (1972)	$\Phi_b = 17(\theta - \theta_{cr})(\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_{cr}})$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Engelund and Fredsoe (1976)	$\Phi_b = 18.74(\theta - \theta_{cr})(\sqrt{\theta} - 0.7\sqrt{\theta_{cr}})$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Fernandez-Luque and van Beck (1976)	$\Phi_b = 5.7(\theta - \theta_{cr})^{\frac{3}{2}}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Parker fit to Einstein (1979)	$\Phi_b = 11.20 \left(1 - \frac{\theta}{\theta_c}\right)^{\frac{9}{2}}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Smart (1984)	$\Phi_b = 4 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} S_0^{0.6} \left(\frac{v_{av}}{u_*}\right) C \theta^{\frac{1}{2}} (\theta - \theta_{cr})$	$d_{30}, d_{50}, d_{90}, \theta_c, \theta_c^S, \rho_s$
Nielsen (1992)	$\Phi_b = 12\theta^{\frac{1}{2}}(\theta - \theta_{cr})$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Wong1(2006)	$\Phi_b = 4.93(\theta - \theta_{cr})^{1.6}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Wong2(2006)	$\Phi_b = 3.97(\theta - \theta_{cr})^{\frac{3}{2}}$	d_{50}, θ_c, ρ_s
Camenen and Larson (2005)	$\Phi_b = 12\theta^{\frac{3}{2}} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_c}{\theta}\right)$	d_{50}, θ_c, ρ_s

參考資料: RiverFlow2D_Reference_Manual

三、模式邊界條件與限制

(一) 水利模型邊界條件

在 RiverFlow2D 模式中可以使用兩種主要的邊界條件類型，一種為開放邊界另一種為封閉邊界，開放邊界是水流可以進出邊界，封閉邊界則假設是固定無流動閉合邊界，就像是水流無法透過的牆面般，如下圖 4-4 所示：

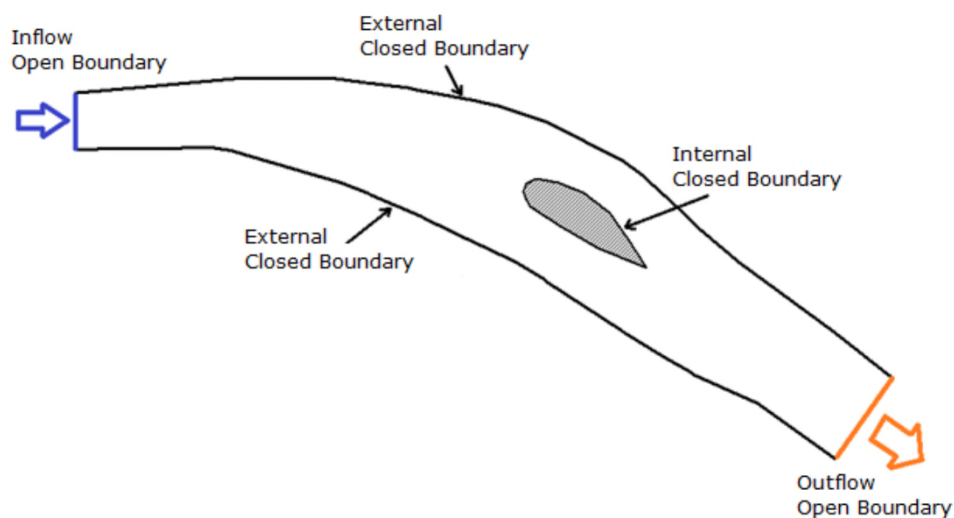


圖 4-4 開放及閉合邊界條件

入口邊界條件和出口邊界條件沒有數量限制，RiverFlow2D 允許有任意數量的流入和流出邊界，同時也接受任何條件情況組合，正確使用這些條件將可成功利用 RiverFlow2D 進行關鍵部分之模擬，依淺水流方程式理論，模擬二維亞臨界流時，要求在出流或是入流至少各需提供一種條件，模擬二維超臨界流時，必須加強入流邊界條件，而不需要給定出流邊界條件，下表 4-2 模式建議之邊界條件：

表 4-2 模式建議邊界條件

邊界流體型式	入流邊界條件	出流邊界條件
亞臨界流	流量 or 流速	水位高程
超臨界流	流量 or 水位高程	無

建議在邊界條件中以水位高程或是每階段流量資料如均勻流都至少提供一種資料，如果只有流量進入而無水位高程條件會違反淺水流方程中理論邊界條件而導致不穩定性，下表 4-3 為 RiverFlow2D 模式提供的開放邊界類型：

表 4-3 開放邊界條件類型

邊界條件型式代碼	描述
1	給定水位高程資料
5	給定水位-流量歷線
6	以垂直於邊界的速度轉換流量
9	給定水位流量率定曲線
10	自由入流、出流，由模式計算流速及水面高程
11	自由流出條件，速度和水面高度由模式計算，但僅允許向外流動。
12	均勻流出流

如果需要在相鄰的邊界線段上施加開放條件，必須按照圖 4-5 方式進行操作，在每個線段之間用一個以上的網格單元隔開，若沒有設置兩個或兩個以上的開放條件，會導致對開放邊界的錯誤檢測。

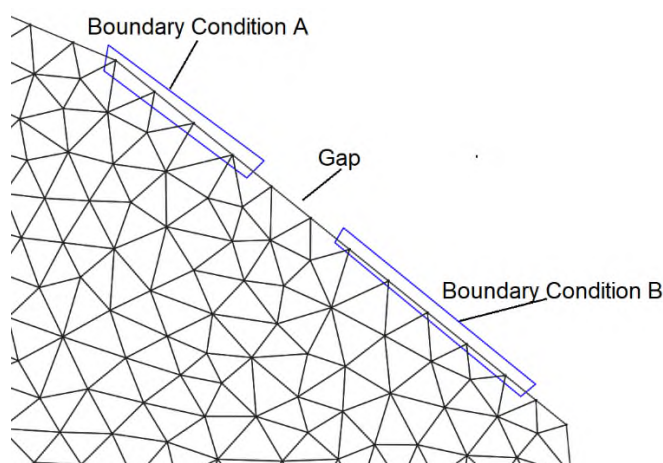


圖 4-5 相鄰開放邊界條件之間的所需間隙

(二) 輸砂模組邊界條件

使用底床載輸砂模型時，可以施加入流邊界條件代碼 6，此邊界條件型式為僅提供流量，在這種情況下，模型將根據平衡條件下選定的泥砂輸送公式確定流入的泥砂排放量。

或者，也可以使用入邊界條件代碼 26，其提供所有入流邊界泥砂部分之泥砂排放量，該資料必須包含排放量與時間序列之關係，舉例如下，如果選擇兩種泥砂種類，使用邊界條件代碼 26 將邊界設為排放量，文件將如以下表 4-4 形式表示：

表 4-4 底床載邊界條件旁放量對應表

時間(hr)	流量(m^3/s 或 ft^3/s)	給定泥砂排放量 (單位為 m^3/s 或 ft^3/s)	
0.0	1000	0.16	2.23
2.0	7000	1.16	2.24
100.0	7000	1.16	2.24

(三) 模式功能與限制

1. 使用非恆定流模型 Navier-Stokes 方程的垂直積分產生的淺水方程，因此，該模型未考慮垂直加速度、垂直速度，因此無法解析二次流。
2. 假設底床剪應力方向是依循深度平均速度方向。
3. 模型不包含分散項及紊流項，紊流耗散與能量損失僅由動量方程式中曼寧粗糙係數 n 值計算。
4. 當選擇底床載模擬時，流入的泥砂輸送率等於平衡條件下的輸送能力。
5. 除了 Smart (1984) 考慮三種尺寸 (d_{30} , d_{50} 和 d_{90}) 之外，模式中其他輸砂公式對泥砂粒徑，都採用單一特徵直徑 (d_{50})。
6. 不考慮底床護甲層作用。
7. 當模式到達最大沖刷深度時，此時模型會給予沖刷深度限制，並阻止進一步沖刷。
8. 由於底床載輸砂率、懸浮載輸砂率和沉降速度的公式皆是基於實驗而得之輸砂定律，其皆已經對各公式考慮了調整參數因子。因此，輸砂模組可以針對每種不同的特定情況校準計算出泥砂輸送量。

第二節 模擬參數設定

一、研究區域地形資料

本團隊在研究區域梗枋南勢溪、大溪溪、水仙溪三處進行空拍，將應用無人飛行載具也就是空拍機進行研究區域地型建置，以空拍機取得高解析度之影像並配合 Pix4D 空拍軟體規劃詳細的飛行航程，且輔以時動態測量(Real Time Kinematic, RTK)之儀器，將研究區域平均放置地面控制點，以便後續在 Pix4DMapper 中修正高程減少誤差，最終可產出精確的數值地表模型。

本團隊使用之軟體為 Pix4DMapper 航測影像專業處理軟體，將空拍所得之影像進行後續正射影像與數值地表模型(DSM)之建置，資料匯入 Pix4DMapper 後須建立專案，地型建置過程分為 3 個步驟：

1. 匯入基本參數並初始化，將空拍所得之影像匹配
2. 三維點雲加密，並加入 RTK 地面控制點資料
3. 生成數值地表模型與正射影像

(一)梗枋南勢溪

由最後生成之專案精度報表可得知，研究區域梗枋南勢溪範圍空拍面積為 0.644km^2 ，地面採樣距離(GSD)為 4.51 公分，也就是地面上測量的兩個連續像素中心之間的距離為 4.51cm，正射影像與數值地表模型(DSM)分別為圖 4-6 與圖 4-7。



圖 4-6 梗枋南勢溪正射影像

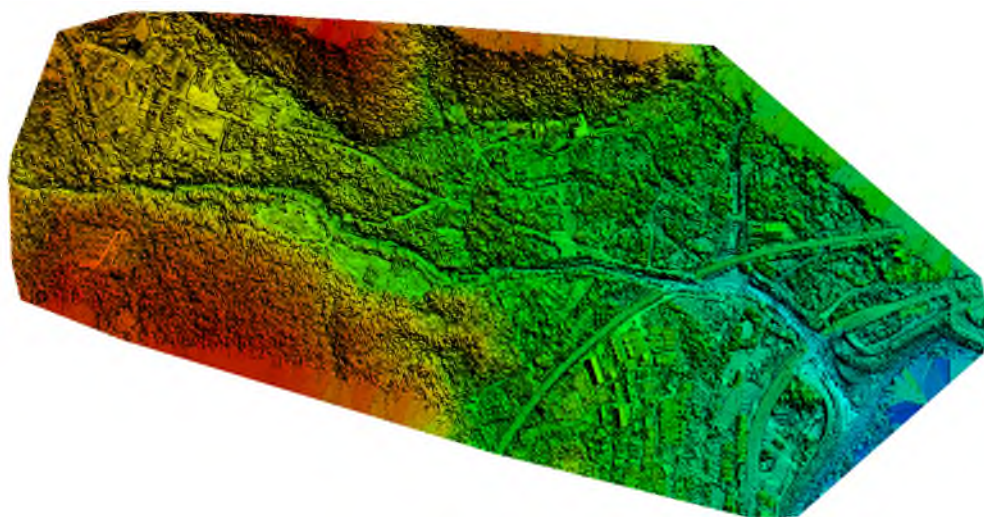


圖 4-7 梗枋南勢溪數值地表模型(DSM)

(二)水仙溪

由研究區域水仙溪最後生成之專案精度報表可得知，空拍範圍面積為 0.077km^2 ，地面採樣距離(GSD)為 1.68 公分，地面上測量的兩個連續像素中心之間的距離為 1.68cm，正射影像與數值地表模型(DSM)分別為圖 4-8 與圖 4-9。



圖 4-8 水仙溪正射影像

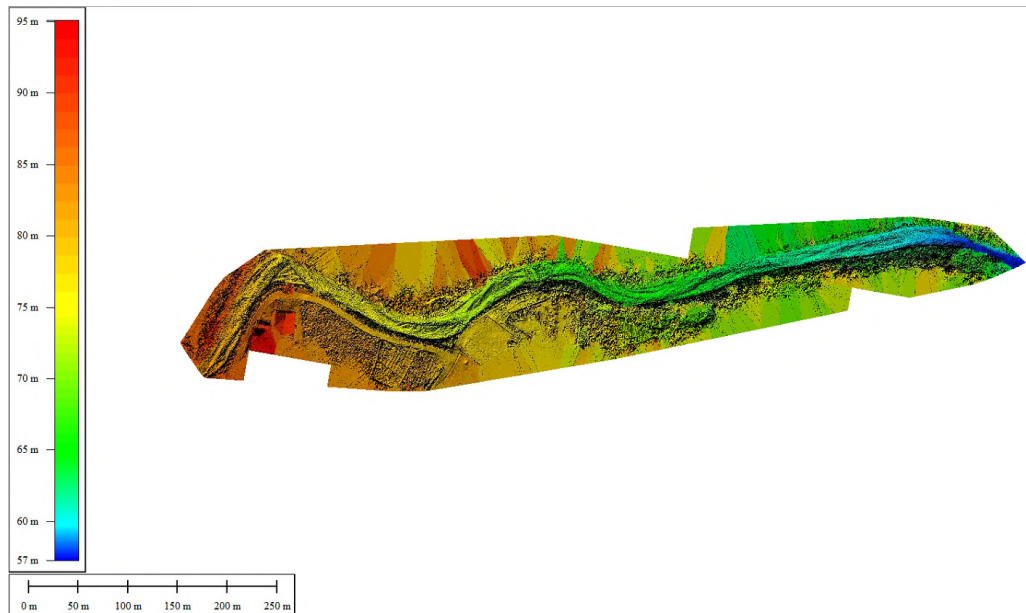


圖 4-9 水仙溪數值地表模型(DSM)

(三) 大溪溪

由研究區域大溪溪最後生成之專案精度報表可得知，空拍範圍面積為 0.047km^2 ，地面採樣距離(GSD)為 4.51 公分，也就是地面上測量的兩個連續像素中心之間的距離為 2.19cm，正射影像與數值地表模型(DSM)分別為圖 4-10 與圖 4-11。

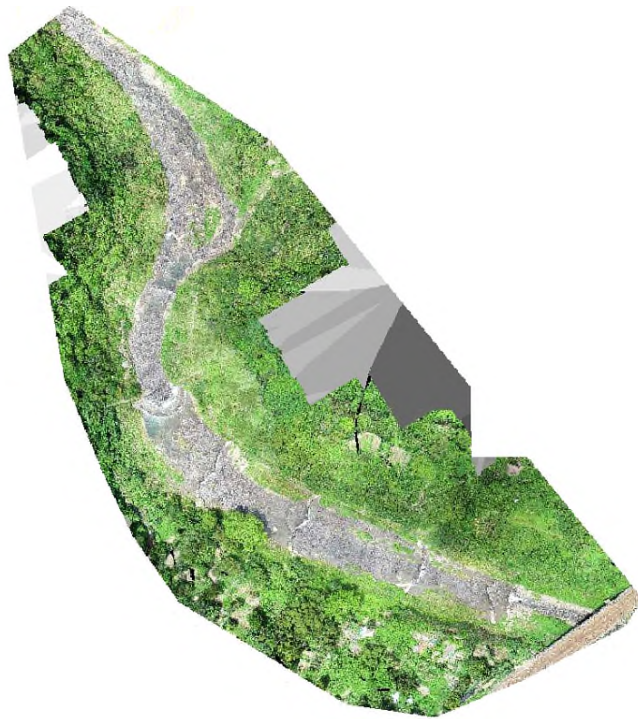


圖 4-10 大溪溪正射影像

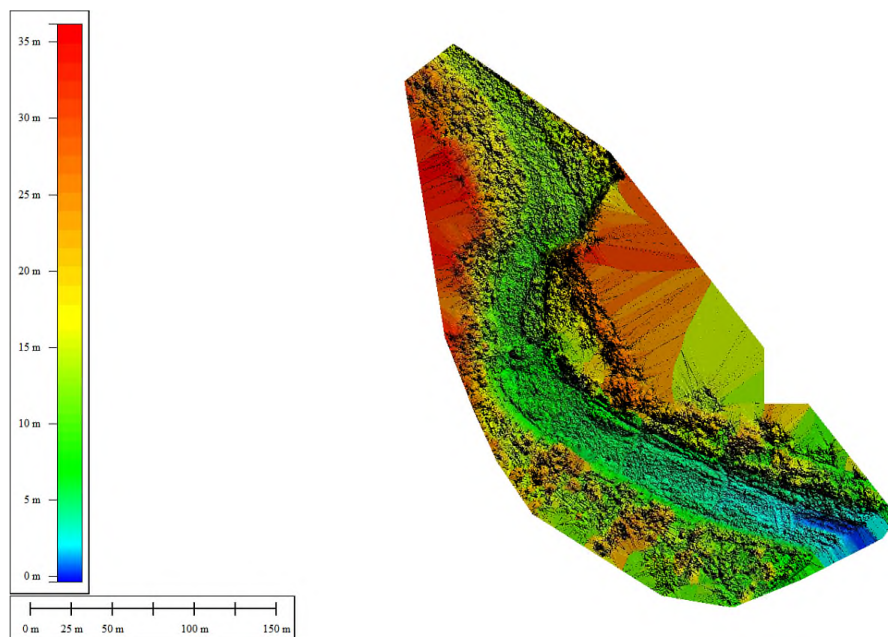


圖 4-11 大溪溪數值地表模型(DSM)

二、曼寧粗糙係數 n 值

根據河床表面粒徑調查分析結果可推求曼寧粗糙係數 n 之值，而表面粒徑一般由表面採樣的樣品即為表層(surface sediment)上之底床材料，可用來計算曼寧粗糙係數 n 值估算河槽或渠道流速，而模式 QGIS 參數中需要輸入參數包含曼寧粗糙係數 n 值資料，因此本研究由表面粒徑進行推求。

(一) 梗枋南勢溪

為取得模式 QGIS 參數中所需要的曼寧粗糙係數 n 值資料，研究區域梗枋南勢溪並無過去文獻資料，本研究參閱整流工程設計參考叢書(2020)中第三節水理分析中第三點表面粒徑粗糙係數說明：

在整流工程設計參考叢書(2020)中提到中下游地區河槽因為保全對象或防洪需要，施作河川工程或渠道工程，沖積河流的砂波發展消長對糙率影響很大，這時糙率如果還當成定值就不適當，由於本研究區域範圍位於梗枋南勢溪中下游部分，且多處施作固床工工程，依照報告書內容應採用以 D_m 為計算之 Stricklers' (1923)公式與何黃氏(1992)，而本研究區域不同地段之表面粒徑變化幅度大，於實地現勘多處河段現地勘查發現河床表面有巨石存在如圖 4-12 所示：



圖 4-12 梗枋南勢溪多處河段河床表面巨石

在依照現地情況判斷其平均表面粒徑 D_m 約落在 10~20cm 左右，將其帶入經驗公式計算如表 4-5；或利用周文德氏所著『Open Channel Hydraulics』書中所提供『渠道與天然河道曼寧粗糙係數 n 值表』，將現場踏勘結果與之比對，選取適當之 n 值。

$$n = \frac{D_s^{1/6}}{A} = C D_s^{1/6}$$

$$n = C' D_s^{1/6}$$

表 4-5 曼寧粗糙係數 n 值之參考公式

整流工程設計參考叢書所提到之以 D_m 計算之兩公式	A	D_s	C, D_s	$C', D_s(cm)$	梗枋南勢溪 D_m (cm)	梗枋南勢溪曼寧 n 值
Stricklers' formula(1923)	21.1	$D_m(mm)$	0.0474	0.0696	15	0.109
何黃氏(1992)	16	$D_m(cm)$	0.0625	0.0625	15	0.098

以 D_m 為計算之 Stricklers' (1923)公式與何黃氏(1992)結果分別為 0.109 與 0.098，將兩者相近數值取平均後約為 0.10，因此模式所採用河槽之曼寧粗糙係數 n 值為 0.10；而河灘地部分，實際前往實地觀測梗枋南勢溪兩側為護岸為大型植生密布至河灘地為濃密至灌木，本研究將於模式中額外劃分曼寧 n 值輸入，本研究參考周文德(1959)與王凱立(2005)建議植被類型河道部分應導入複合式曼寧 n 值如下圖

圖 4-13 所示：

洪水平原植生情形	最小值	一般值	最大值
A.牧草，無灌木			
1.低草	0.025	0.030	0.035
2.高草	0.030	0.035	0.050
B.耕地			
1.無作物	0.020	0.030	0.040
2.成熟之列植作物	0.025	0.035	0.045
3.成熟之野地作物	0.030	0.040	0.050
C.灌木			
1.稀疏灌木、濃密雜草	0.035	0.050	0.070
2.冬季稀疏之灌木及喬木	0.035	0.050	0.060
3.夏季稀疏之灌木及喬木	0.040	0.060	0.080
4.冬季中等到濃密之灌木	0.045	0.070	0.110
5.夏季中等到濃密之灌木	0.070	0.100	0.160
D.喬木			
1.夏季直立之柳屬喬木	0.110	0.150	0.200
2.有喬木殘幹之空地，殘幹未發芽	0.030	0.040	0.050
3.有喬木殘幹之空地，樹芽生長濃密	0.050	0.060	0.080
4.挺立之樹木林立，少許傾倒，夾雜些許灌木叢，洪水水位低於樹枝	0.080	0.100	0.120
5.同上，但洪水水位高於樹枝	0.100	0.120	0.160

圖 4-13 植被型河道複合式曼寧 n 值

本研究於實地現勘梗枋南勢溪發現，梗枋南勢溪兩岸多喬木，而靠近河灘地部分為濃密之灌木，因此採用於 C5.至 D1.之間，再考慮河槽輸入值與兩者之間後平均後，曼寧粗糙係數 n 值將採用 0.13 作為模式河灘地之輸入值。

(二)水仙溪

本研究區域水仙溪範圍河段位於水仙溪多處施作固床工工程區，因此採用與梗枋南勢溪相同之計算方式以 D_m 為計算之 Stricklers' (1923)公式與何黃氏(1992)，本研究也實地探勘水仙溪固床工河段現地河床表面粒徑如下圖、所示：



圖 4-14 水仙溪工程現況圖

依照現地情況判斷最終計算出河槽部分曼寧粗糙係數 n 值為 0.04 並作為模式輸入值，而河灘地部分也如同梗枋南勢溪之方式以參考文獻作為判斷依據，而水仙溪兩側土壤裸露並無過多植被覆蓋，因此最終河灘地之曼寧粗糙係數 n 值採用值為 0.045。

(三)大溪溪

本研究區域大溪溪工程河段與梗枋南勢溪相識，皆位於河段下游近出海口，且同為頭城沿海集水區，本研究實地探勘現地河床表面粒徑如下圖所示：



圖 4-15 大溪溪工程現況圖

可以發現其表面粒徑與梗枋南勢溪皆為大型礫石，表面粒徑 D_m 約落在 10~20cm 左右，因此與梗枋南勢採取相同算法計算出模式河槽之曼寧粗糙係數 n 值為 0.10；河灘地部分則採並未如梗枋南勢溪植被較密布，因此參考文獻最終所採取之模式河灘地曼寧粗糙係數 n 值為 0.11。

三、土壤顆粒密度

過往輸砂經驗公式大多由水槽實驗、迴歸搭配統計所推導出來，所採用的土壤顆粒密度可代表為泥沙之重力特性，大多數礦物性土壤顆粒密度約為 2600 kg/m^3 至 2700 kg/m^3 ，以一般石英砂為例，其顆粒密度為 2650 kg/m^3 。

(一)梗枋南勢溪

由室內土壤顆粒密度試驗求得梗枋南勢溪現地採取土樣之土壤顆粒密度，試驗主要工具有比重瓶、磅秤、烘箱、溫度計，實驗步驟為：

1. 自乾燥器中取出比重瓶，稱其重量 W_b 。
2. 每瓶中加入約 15g 之乾土，稱(瓶+乾土)重 W_{bs} 。則乾土重 $W_s = W_{bs} - W_b$ 。
3. 加蒸餾水入瓶，使其充分淹末土樣。
4. 將比重瓶移至鍋中隔水加熱，經常搖動幫助 氣泡逸出，沸騰後 15 分鐘即可。
5. 將其置入恆溫水槽內使其冷卻至室溫後，加 蒸餾水至瓶頸之刻劃線處。
6. 拭乾瓶外之水並稱(瓶+乾土+水)重 W_2 。

7. 將瓶中之土清出，洗淨後注入蒸餾水，再將其放入恆溫水槽內讓溫度平衡後再加蒸餾水至瓶頸之刻劃線處。
8. 拭乾瓶外之水並稱(瓶+水)重 W_1 。
9. 記錄恆溫水槽溫度 T ，測得 T 為 16 度，求 k 。
10. $G_{S(16^{\circ}\text{C})} = \frac{W_s}{W_1 - W_2 + W_s} \times k$

計算最後得到本試驗區之土壤顆粒密度為 2500 kg/m^3 。

表 4-6 水溫與校正係數 k 表

水溫	k	水溫	k
16	1.0008	21	0.9998
17	1.0006	22	0.9996
18	1.0004	23	0.9993
19	1.0002	24	0.9991
20	1.0000	25	0.9989

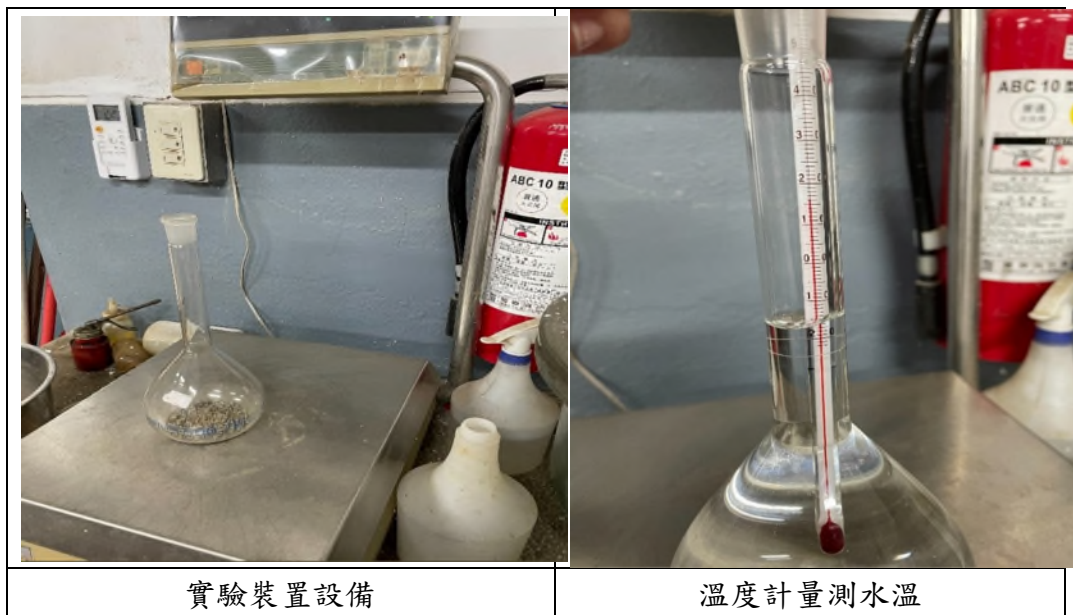
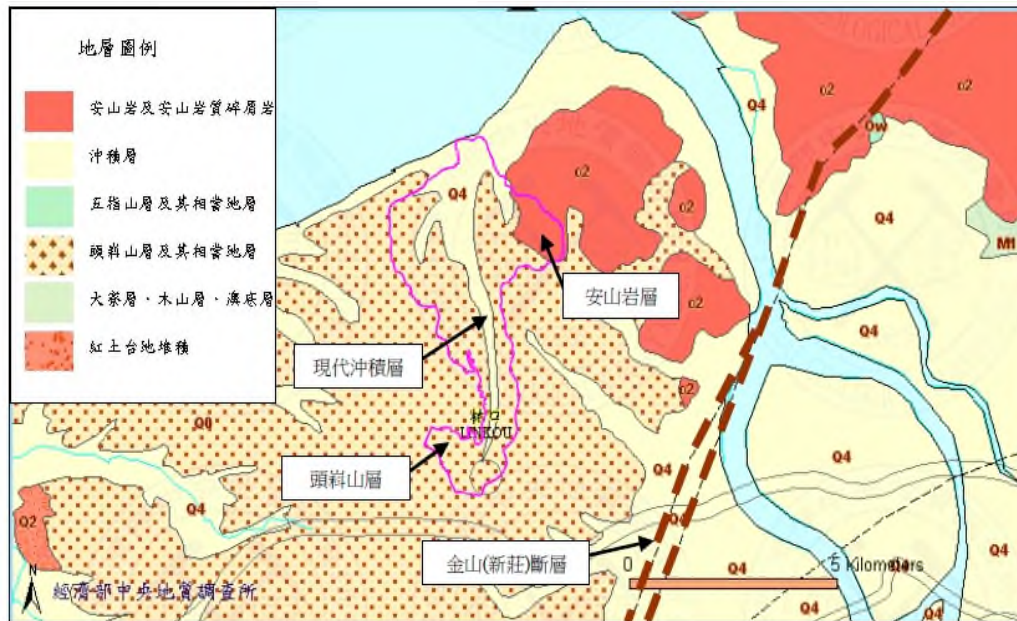


圖 4-16 實驗儀器與量測

(二)水仙溪

研究區域水仙溪本研究參考縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，

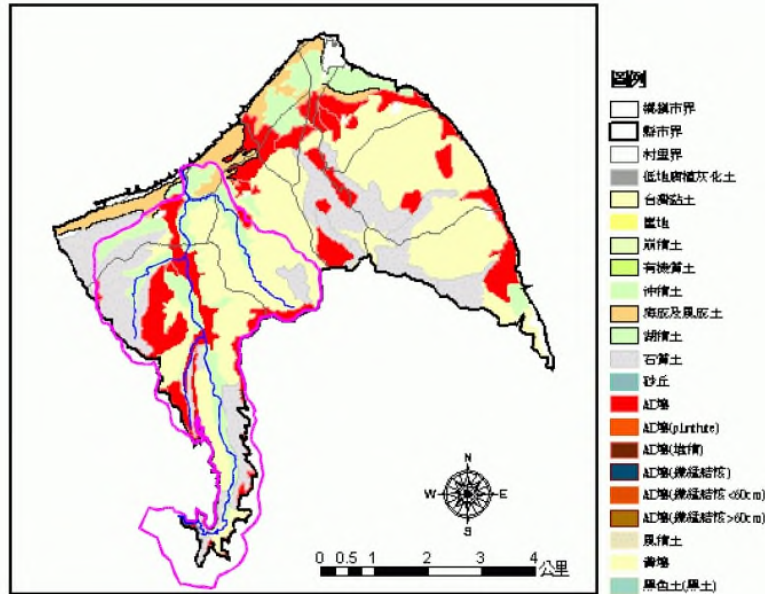
其中報告書針對水仙溪流域區域地質進行分析研究，文中提到水仙溪主流為現代沖積層，流域中上游則多為頭嵙山層，流域東側觀音山則為安山岩層，而本研究進行研究範圍之河段分布於現代沖積層與頭嵙山層如下圖所示：



資料來源:新北市政府縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告

圖 4-17 水仙溪流域範圍地質示意圖

現代沖積層主要由第四紀末固結之砂沉泥與礫石層所堆積而成，而頭嵙山層由未固結的礫石，薄層或凸鏡狀砂、粉砂、泥及紅土層所組成，而兩種地層之土壤類型如下圖所示：



資料來源:新北市政府縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告

圖 4-18 新北市境內土壤分布狀況圖

報告中提到高溫多雨及平地少而山區多之地形下，岩石風化作用相當迅速，所發育之土壤，除地勢傾斜處外，土層大多深厚約數公尺至數十公尺，且由於雨量充沛，分布均勻，終年淋洗土壤作用盛行，岩石風化分離之鹽基物質，多被雨水沖蝕，因此除低地外，高地土壤成酸性反應，pH 值多在 5 左右，同時因矽酸向下移動，遺留大部分之鐵鋁氧化物，使土壤多呈棕紅色或棕黃色，即計畫區常見之紅棕壤或黃棕壤，此類型土壤顆粒密度約落在 $2200\text{--}2800\text{ kg/m}^3$ ，將其取平均，因此本研究將以過去文獻資料進行參數設定，將模擬所需之土壤顆粒密度參數設為 2500 kg/m^3 。

(三)大溪溪

研究區域大溪溪則因鄰近梗枋南勢溪，皆屬頭城沿海集水區，若欲使用土砂模式及觀測評估則，則以最近取得之梗枋南勢溪實地採樣帶回進行的實驗資料較為精準，且本研究同時參考過去文獻資料行政院農業委員會水土保持局台北分局報告書—頭城沿海集水區大規模

土砂模式及觀測評估，書中提到大溪溪集水區內之地層分布主要由大桶山層、澳底層、乾溝層等 3 種地質所組成如圖所示：



資料來源：頭城沿海集水區大規模土砂模式及觀測評估報告書

圖 4-19 大溪溪集水區五萬分之一環境地質圖

而土壤方面依據水土保持局土壤分布數值資料圖資顯示，大溪溪集水區範圍內土壤包含幼黃壤及黃壤等二種性質，包含幼黃壤及黃壤等二種性質如圖所示：



資料來源：頭城沿海集水區大規模土砂模式及觀測評估報告書

圖 4-20 大溪溪集水區土壤分布圖

大溪溪與梗枋南勢溪現地採取之土壤性質相似因此採用同為梗枋沿海鄰近之梗枋南勢溪現地採樣數值，研究區域大溪溪模擬輸入之土壤顆粒密度為 2500 kg/m^3 。

四、中值粒徑(D50)

中值粒徑為採樣土砂樣品的累計粒度分佈百分數達到 50%時所對應的粒徑（或稱 50%通過粒徑），D10 表示累計 10%點的粒徑，D50 的物理意義是粒徑大於它的顆粒佔 50%，小於它的顆粒也佔 50%，所以 D50 也叫中位粒徑。

(一)梗枋南勢溪

本團隊於現地梗枋南勢溪進行採樣孔粒徑調查分析，點位如圖所示：

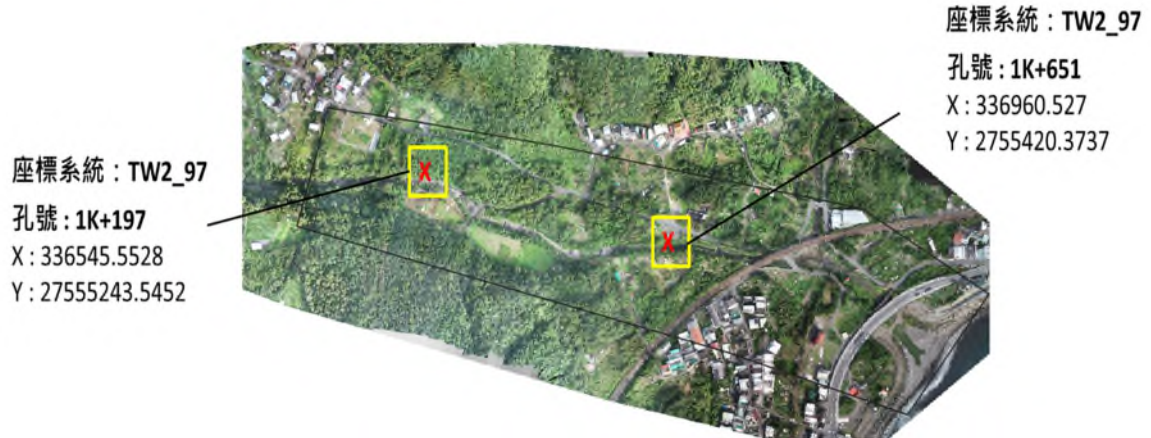


圖 4-21 梗枋南勢溪採樣孔號位置

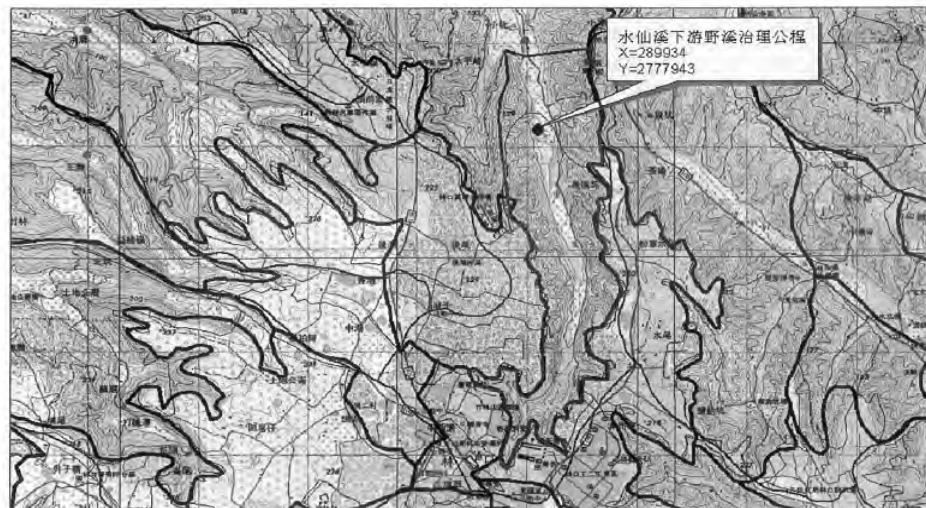
以四分法取樣品回室內進行細粒徑分析，最終求得粒徑分布曲線，取通過百分比 50%之河床質粒徑大小，本試驗區中值粒徑大小為 27.53 毫米，詳細資料如下表所示：

表 4-7 梗枋南勢溪河床質採樣粒徑分佈曲線表

位置	TW2_97 (X)	TW2_97 (Y)	D20	D35	D50	D65	D75	D90
1K+197	336545.5528	2755524.5425	8.67	12.61	27.53	67.98	104.40	162.28
1K+651	336960.5275	2755420.3737	7.7	10.32	19.74	26.75	31.94	65.14

(二)水仙溪

研究區域水仙溪本研究將參考過去文獻資料—縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，報告中對於水仙溪不同斷面進行詳細河床值採樣分析，而研究區域固床工工程(水仙溪下游野溪治理工程)點位位於斷面 22 左右如下圖所示：



集水區面積=272公頃

TWD97

X=289934

Y=2777943

圖 4-22 水仙溪下游野溪治理工程點位

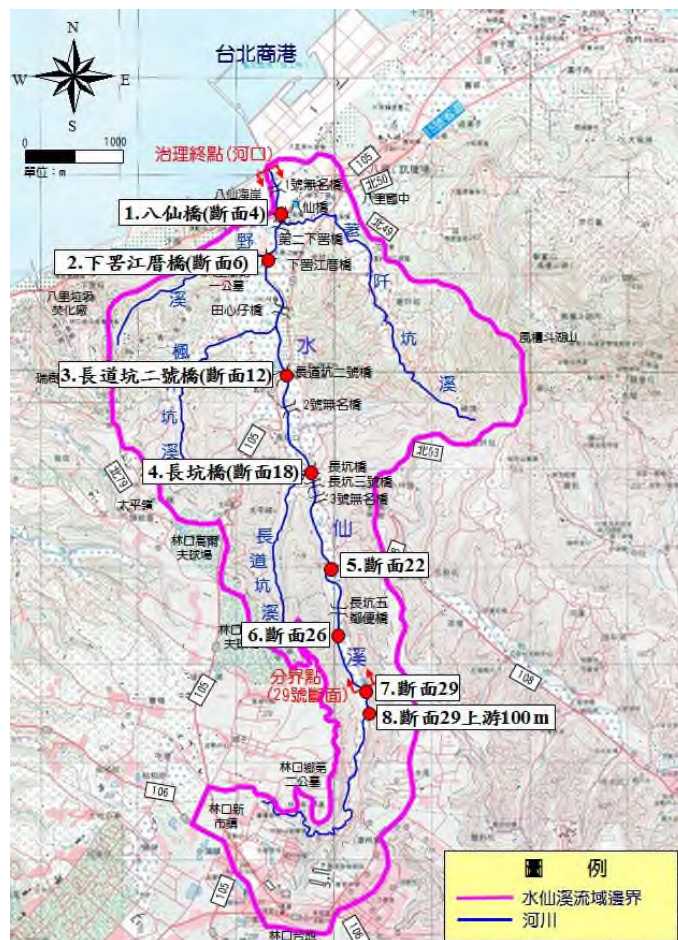


圖 4-23 水仙溪溪流不同断面點位位置

而報告中於水仙溪進行河床值採樣分析如下表：

表 4-8 水仙溪斷面土壤資料表

斷面 號	孔 號	平 均 粒 徑 (m m)	代表粒徑(mm)									最 大 石 徑 (m m)	砂 質 含 量 (%)
			d10	d20	d30	d35	d40	d50	d65	d75	d90		
04	1	39. 63	0.3 52	0.6 8	4.08	10.6 4	17.0 2	26.7 4	44.8	62.4 4	110. 27	17 0	27. 05
06	2	34. 57	0.3 45	0.5 95	3.74 1	7.33 7	11.8 78	20.5 47	34.3 21	53.1 96	106. 188	16 5	28. 24
12	3	87. 06	0.4 02	10. 94	35.5 2	44.4 3	51.3 6	65.7 5	111. 55	148. 39	184. 14	33 0	17. 04
18	4	71. 91	0.4 4	2.6 4	13.3 1	19.1	27.1 4	41.9 3	66.7 7	110. 73	182. 67	40 0	19. 59
22	5	126 .62	13. 4	18. 56	40	54.7 1	71.3 1	100. 01	161. 32	224. 77	293. 1	40 0	11. 52
26	6	119 .92	0.4 55	19. 488	46.9 39	69.2 75	90.5 56	119. 947	150. 984	184. 416	283. 117	36 0	15. 87
29	7	229 .69	10. 653	56. 075	114. 511	134. 863	155. 435	202. 378	299. 295	390. 548	494. 267	56 0	7.1 9
29 (上 游 100 m)	8	162 .19	7.1 95	36. 951	72.9 44	91.5 7	110. 51	139. 659	179. 278	222. 904	449. 244	47 0	8.1 9

資料來源:新北市政府縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告

研究區域固床工工程(水仙溪下游野溪治理工程)點位位於斷面 22，因此水仙溪中值粒徑大小為 100.1 毫米。

(三)大溪溪

研究區域大溪溪本研究將參考過去文獻資料行政院農業委員會

水土保持局台北分局報告書—頭城沿海集水區大規模土砂模式及觀測評估，書中針對宜蘭縣頭城鎮大溪溪 5 處點位進行河床值粒徑採樣如下圖，採樣詳細資料如表：



資料來源：頭城沿海集水區大規模土砂模式及觀測評估報告書

圖 4-24 大溪溪集水區河床質採樣點位分布圖

表 4-9 大溪溪採樣土壤資料表

試坑編號	樣孔 D10	樣孔 D20	樣孔 D30	樣孔 D40	樣孔 D50	樣孔 D65	樣孔 D75	樣孔 D90
大溪 A	1.07	2.56	4.88	12.45	49.92	119.11	154.32	194.86
大溪 B	0.98	7.19	20.99	35.71	71.46	125.26	177.82	299.22
大溪 C	4.47	23.74	56.71	90.01	118.92	172.44	234.76	317.74
大溪 D	2.07	7.37	15.26	23.26	66.31	140.17	185.65	308.97
大溪 E	2.97	9.33	32.11	103.97	124.90	155.73	174.81	210.98

同樣取研究區域內點位大溪 A、大溪 B、大溪 C、大溪 D，四點

進行平均後，所得出之研究區域大溪溪中值粒徑 D50 為 76.65 毫米。

五、孔隙率

土壤因係多孔介質的一種，因此不管土壤之組成如何，均有孔隙存在，土壤孔隙率之定義為： $n = \frac{V_v}{V}$ ，上式中 n 為土壤孔隙率； V_v 為土壤孔隙所佔之體積； V_t 為土壤之總體積。

(一) 梗枋南勢溪

研究區域梗枋南勢溪由土壤含水量及乾單位重、濕單位重配合土壤比重求得土壤孔隙率，其計算方式如下所示：

$$\begin{aligned}\gamma_d &= \frac{G_s}{1+e} \times \gamma_w \\ e &= \frac{G_s \times \gamma_w}{\gamma_d} - 1 = \frac{2.63 \times 1}{1.69} - 1 = 0.61 \\ n &= \frac{V_v}{V} \times 100\% \\ n &= \frac{e}{1+e} = \frac{0.61}{1+0.61} = 0.378\end{aligned}$$

其中 γ_d 為土壤乾單位重、 G_s 為土壤比重、 e 為孔隙比、 γ_m 為濕土單位重、 w 為土壤含水量、 V_v 為土壤內孔隙體積， V 為土壤總體積。

(二) 水仙溪

研究區域水仙溪本研究參考縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告中所提到水仙溪屬卵礫石河床，而卵礫石孔隙率介於 30~40% 之間，因此取平均值 0.35 作為水仙溪之土壤孔隙率輸入參數。

(三) 大溪溪

研究區域大溪溪則因鄰近梗枋南勢溪，皆屬頭城沿海集水區，若欲使用土砂模式及觀測評估則，則以最近取得之梗枋南勢溪實地採樣

帶回進行的實驗資料較為精準，因此研究區域大溪溪模擬輸入之土壤孔隙率為 0.378。

六、安息角

土壤自然堆積，經沉落穩定後，將會形成一個穩定的，坡度一致的土體表面，此表面即稱為土壤的自然傾斜面。自然傾斜面與水平面的夾角，就是土壤的自然傾斜角，即安息角。以 α 表示。

(一) 梗枋南勢溪

本研究梗枋南勢溪現地土壤採用注入法測定安息角，其步驟為用塞棒塞住漏斗流出口。將塵樣放入盛樣量筒，用刮片刮平後倒入漏斗，抽出塞棒，使粉塵從漏斗孔口上方，對於流動性不好的粉塵，可以用棒針攪動使粉塵連續流落到料盤上。待粉塵全部累積後，旋轉量角器量出料盤上粉塵錐體母線與水平面所夾銳角，即安息角，並記錄，應連續測定 3 次~5 次，求出平均值，最後測得之安息角為 31° 。

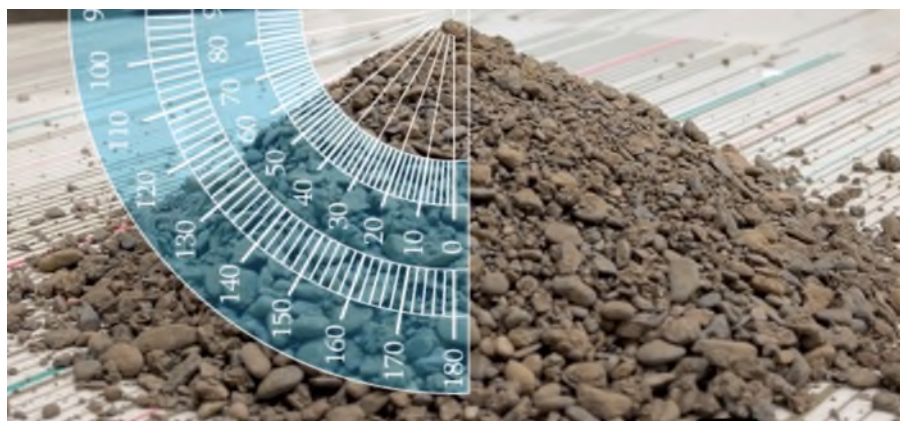


圖 4-25 安息角角度量測

(二) 水仙溪

研究區域水仙溪本研究參考縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告中所提到水仙溪屬卵礫石河床，而礫石土壤安息角約為 35° 左右，因

此取 35° 作為水仙溪之土壤安息角輸入參數。

(三)大溪溪

研究區域大溪溪則因鄰近梗枋南勢溪，皆屬頭城沿海集水區，若欲使用土砂模式及觀測評估則，則以最近取得之梗枋南勢溪實地採樣帶回進行的實驗資料較為精準，因此研究區域大溪溪模擬輸入之土壤安息角為 31° 。

七、模式最大沖刷深度

在 QGIS 介面外掛 Riveflow 2D 設定中可以增加最大沖刷深度圖層，此為模擬中重要之參數，其一為固床工區域為水泥鋪面，沖刷應設為 0，二是避免沖刷區土壤無止盡向下掏刷而導致與現實情況不符，因此本研究將三條野溪梗枋南勢溪、水仙溪、大溪溪三者之固床工區域最大沖刷設置為 0 m，其餘地區則設為 2 m，其中梗枋南勢溪所設置之圖層狀況如下圖 4-26 所示：

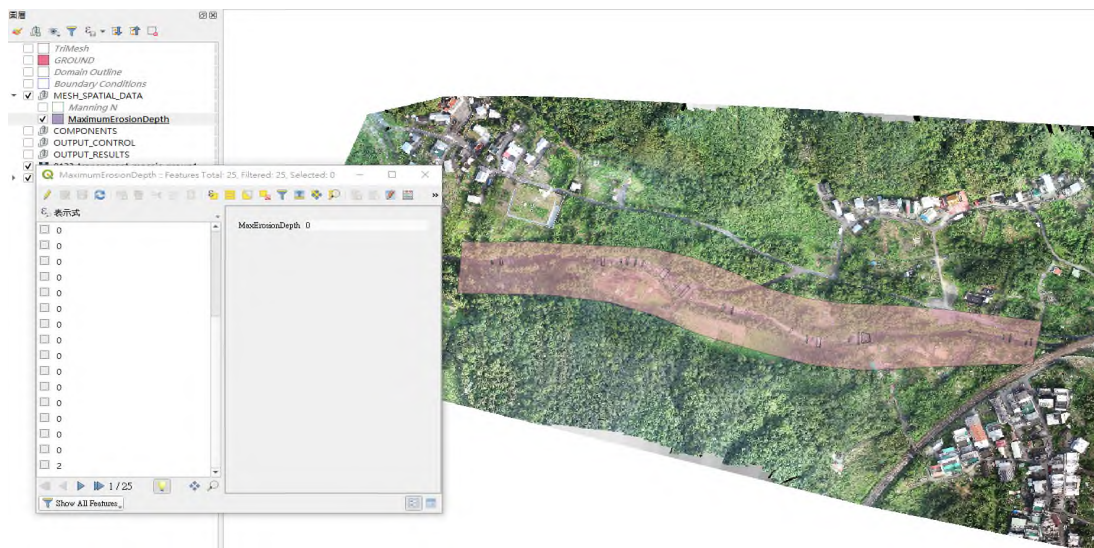


圖 4-26 設置最大沖刷深度（以梗枋南勢溪為示意圖）

第三節 敏感度分析

在進行情境模擬前，為了將系統中輸出的不確定性如何在輸入中被分配到不同的來源，必須先進行數值模形與研究區域敏感度分析，此舉能系統增加對系統或模型中輸入和輸出變量之間關係的理解，也能在存在不確定性的情況下測試模型或模式結果的穩健性，通過識別導致輸出中存在顯著不確定性的模型輸入來減少不確定性，因此應該成為關注的焦點，以便提高模式結果正確性。

在過去水理模式與室內水槽試驗中，敏感度分析內容會因應所選定場所不同而有不同，本研究參考過去相關野溪數值模擬文獻敏感度分析，選取 River Flow 2D 模式中，重要之兩項可調參數進行敏感度分析，分別為網格解析精度及可蘭數，因此下列將針對網格解析精度及可蘭數兩大面向進行敏感度分析並逐步做一說明：

一、網格解析度

RiverFlow2D 數值方法採用顯式有限體積法計算，採用可變時間步距，將時間步距控制在最大及最小步距之間，定義：

$$\chi_i = \frac{A_i}{\max l_k}$$

$$\Delta t \leq \text{CFL} \Delta t^{\tilde{\lambda}}$$

$$\Delta t^{\tilde{\lambda}} = \frac{\min(\chi_i, \chi_j)}{\max |\tilde{\lambda}^m|}$$

其中， χ_i 為相對長度、 A_i 為網格面積大小、 l_k 為網格交界長度，相對長度即為網格面積大小除以最大網格交界長度。 Δt 為時間步距、CFL為可蘭數、 $\tilde{\lambda}$ 為 Jacobian 矩陣的特徵值，Jacobian 矩陣為近似網格

間流通量時所假設，此式意義為：時間步距係數 $\Delta t^{\tilde{\lambda}}$ 等於最小相對長度除以最大網格間流通量大小，意即當網格間相對長度小、流通量大時，時間步距係數較小，此時的時間步距 Δt 也較小。

因此本研究第一步將針對 River Flow 2D 模式所設定之網格精度進行調整，以了解不同網格解析度中最適合研究區域之網格大小來避免動床模擬時發散之問題，因此將網格 5 公尺依序往下調至 1 公尺，分別列出網格數量：

表 4-10 網格距離數量對應表

平均網格距離	網格數量
5m	18886
4m	29752
3m	48764
2m	116387
1m	466323

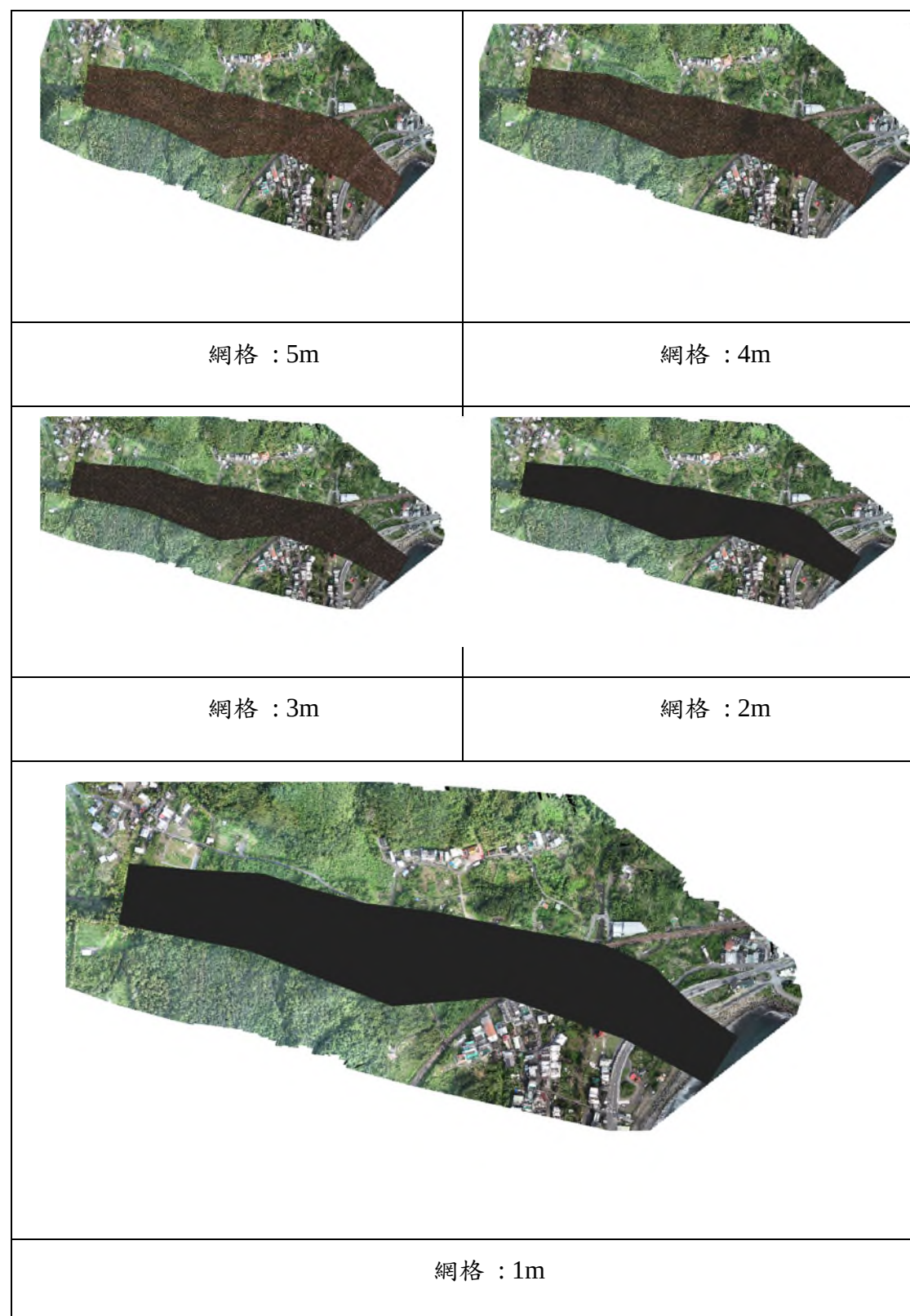


圖 4-27 不同網格大小呈現圖

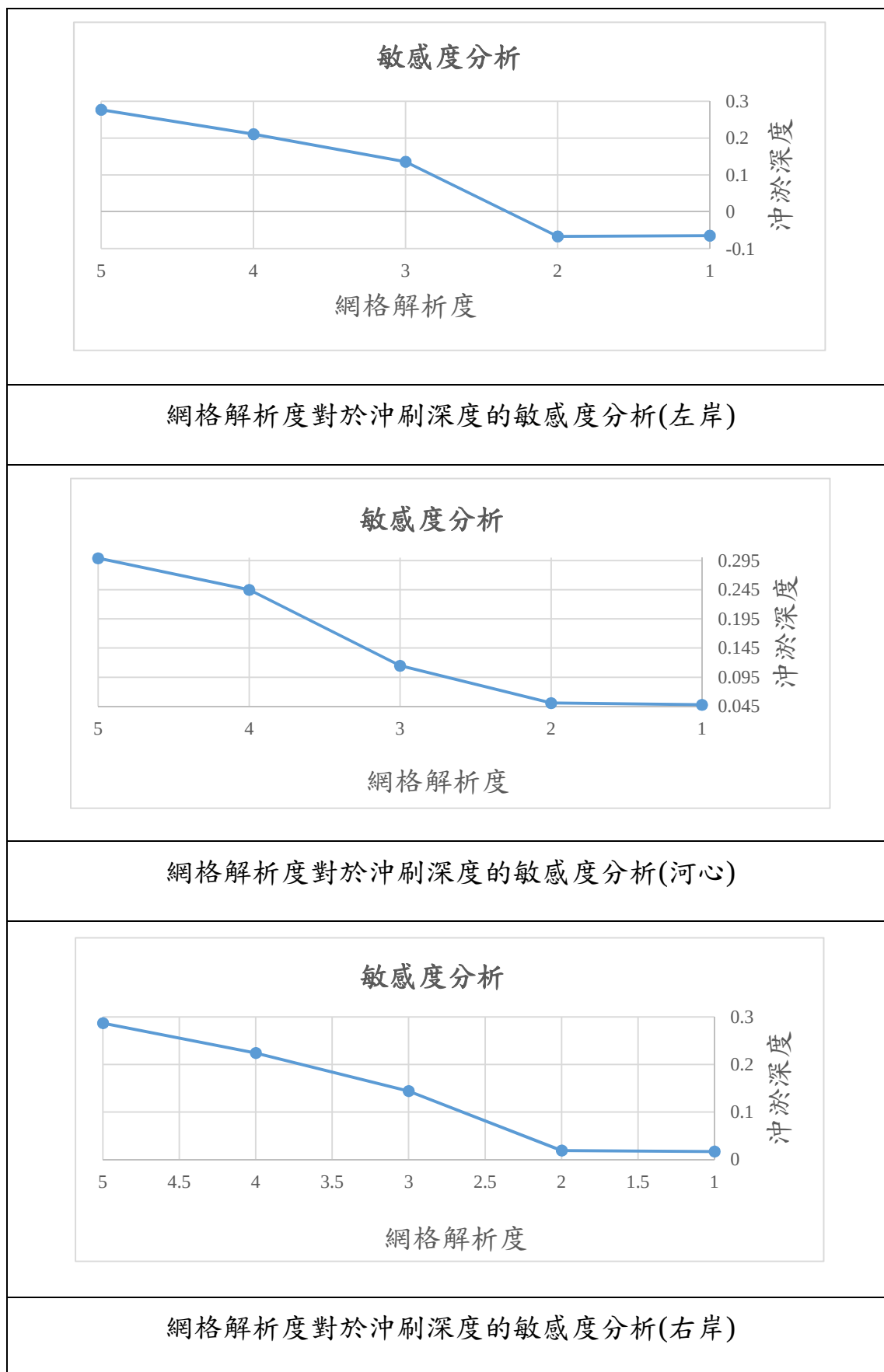


圖 4-28 網格敏感度分析

三個資料分別為河流橫斷面之左岸、河心中央、右岸，格解析度將從 5 公尺降至 1 公尺，由三張圖可以發現網格解析度由 5 公尺降至 2 公尺後，沖淤深度趨向穩定，當網格解析度降至 1m 時沖淤深度與 2m 時之沖淤深度極為接近，可發現 2m 之後網格解析度穩定，故本研究網格解析度將採取更為精細之 1m 網格精度作為模擬輸入參數。

二、可蘭數(Courant Number)

述提到 RiverFlow2D 數值方法採用顯式有限體積法計算，顯式求解用於計算與當前時間步不同時間的給定系統狀態，在數值模擬中穩定性常取決一重要參數，即可蘭數(Courant number)：

$$\text{可蘭數 } C_r = U * \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

在有限差分和有限體積方法中的穩定性和收斂性分析中有一個很重要的概念，就是可蘭數條件，在可蘭數條件中可蘭數必須小於 1，而由於可蘭數是計算流體力學中判斷收斂的條件，因此本研究將對梗枋南勢溪進行 Courant Number 敏感度分析，首先將可蘭數由 1 降至 0.5 沖淤模擬圖如下圖 4-29 所示：



Courant Number : 1



Courant Number : 0.9



Courant Number : 0.8



Courant Number : 0.7

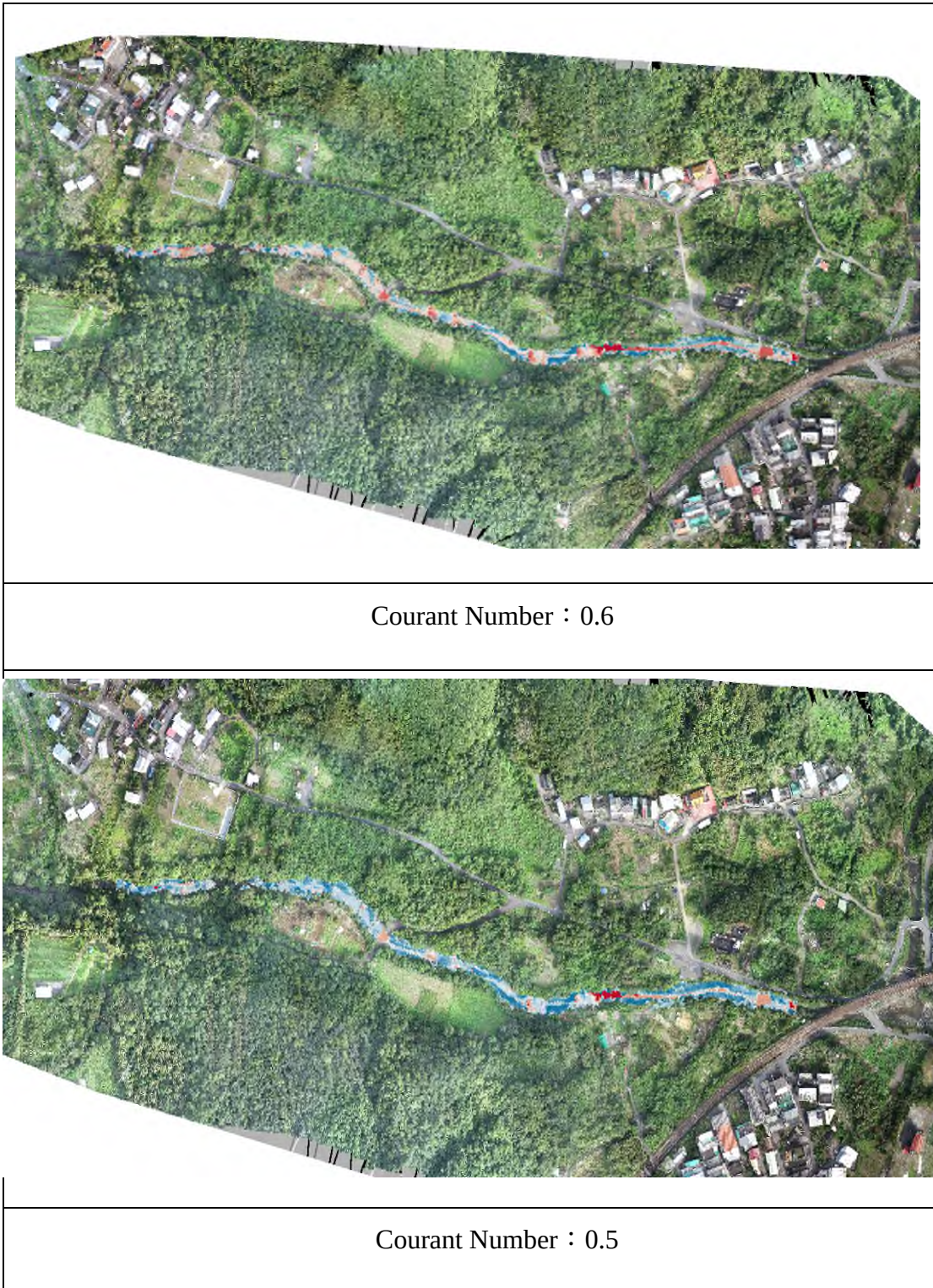


圖 4-29 不同 Courant Number 沖淤模擬圖

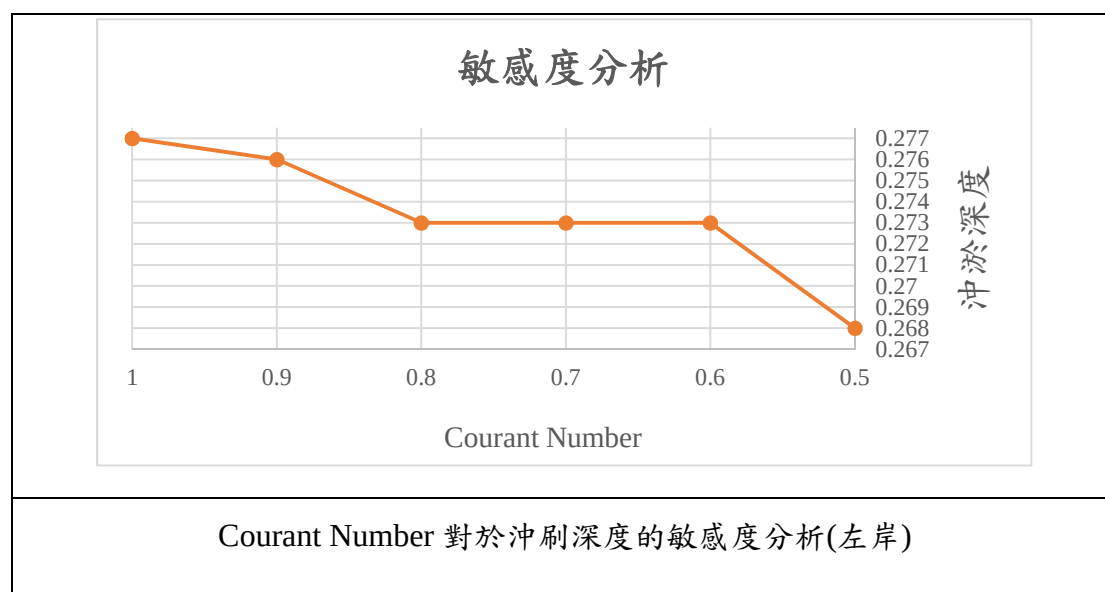
由整體沖淤模擬圖可以看出，Courant Number 為 1 時整體沖刷深度較大且淤積部分過少，但在 Courant Number 逐漸降至 0.8、0.7 後，整體沖淤情勢已達穩態，但再將 Courant Number 往下調至 0.5 時，可

以由圖中看出整體沖刷深度下降且淤積部分過多，由圖中情勢可看出 Courant Number 在 0.8-0.6 之間模式輸出結果較為穩定，但為了更確切得出不同 Courant Number 所對比之沖淤深度，本研究再將各沖淤圖同一斷面同網格左岸至、河心、右岸各取一點如圖 4-30 所示：



圖 4-30 GIS 取點計算示意圖

利用 GIS 計算其同網格沖淤面積進行比較分析並利用 excel 出圖表橫軸做為 Courant Number、縱軸為沖淤深度並出圖成圖表曲線詳細看出其穩定狀態如下圖 4-31 所示：



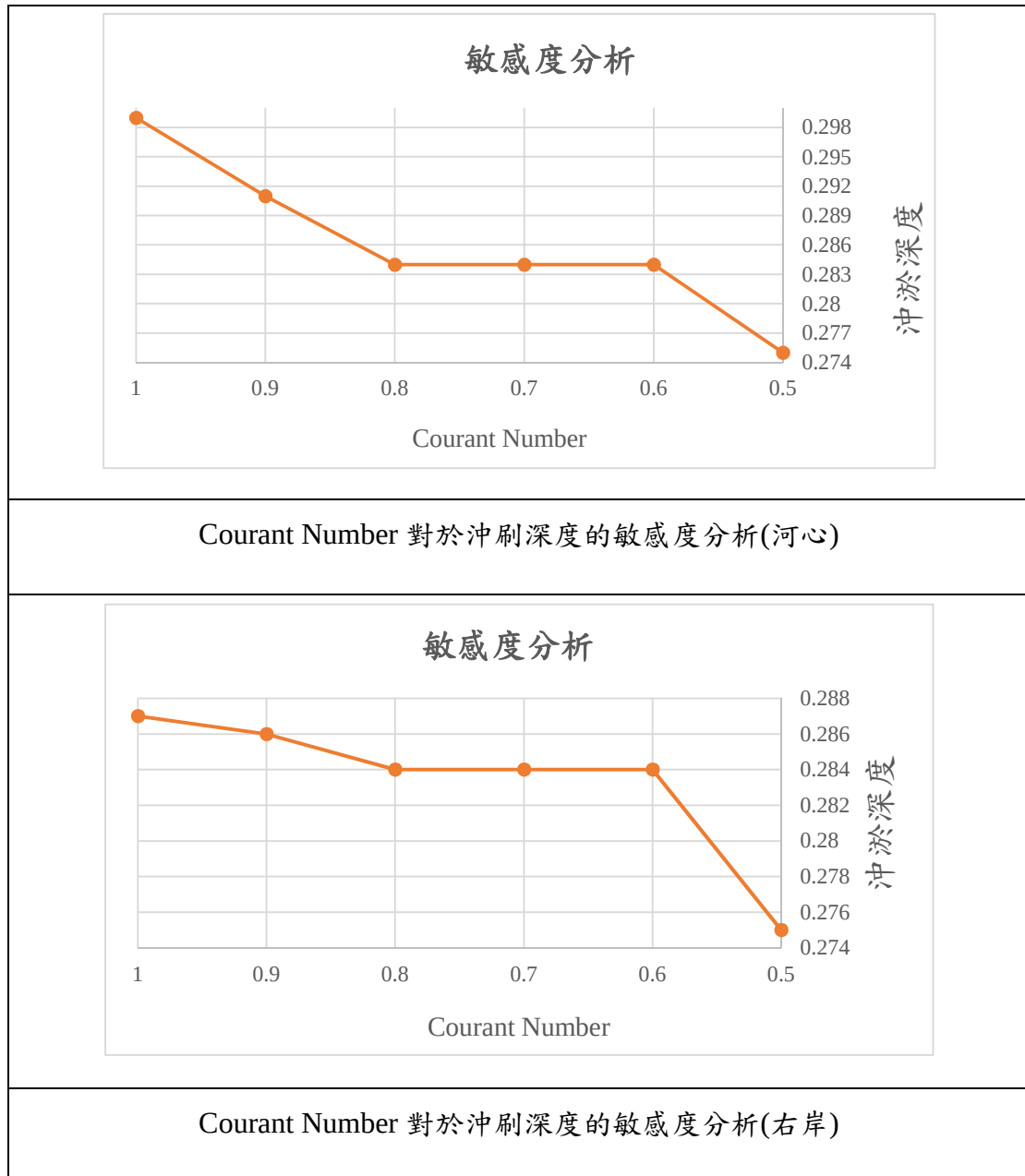


圖 4-31 Courant Number 敏感度分析

三個資料分別為河流橫斷面之左岸、河心中央、右岸，Courant Number 將從 1 降至 0.5，由三張圖可以發現 Courant Number 由 1 降至 0.8 後，沖淤深度皆趨向穩定，但降至 0.5 時又破壞了穩態，可發現降至 0.5 後開始發散，故本研究 Courant Number 將採取 0.7 作為模擬輸入參數。

三、河床寬度

網格解析度所取決之因素為網格大小，而可蘭數與網格解析度又有關，因此若要將網格實際分析於三條溪中，必須分析三條溪流中河床寬度作為判定依據：

(一)梗枋南勢溪

本研究區域梗枋南勢溪實地現勘量測其平均河床寬度為為 10 m 左右如下圖、所示，若以前兩節網格解析度與可蘭數對於梗枋南勢溪之敏感度分析，結果顯示最適合梗枋南勢溪河床寬度 10 m 之網格大小為 1m x 1m，可蘭數則為 0.7。



圖 4-32 梗枋南勢溪現況圖

(二)水仙溪

研究區域水仙溪以現地空拍之空拍圖使用 GIS 量測其平均河床寬度為 20 m 左右如下圖所示：

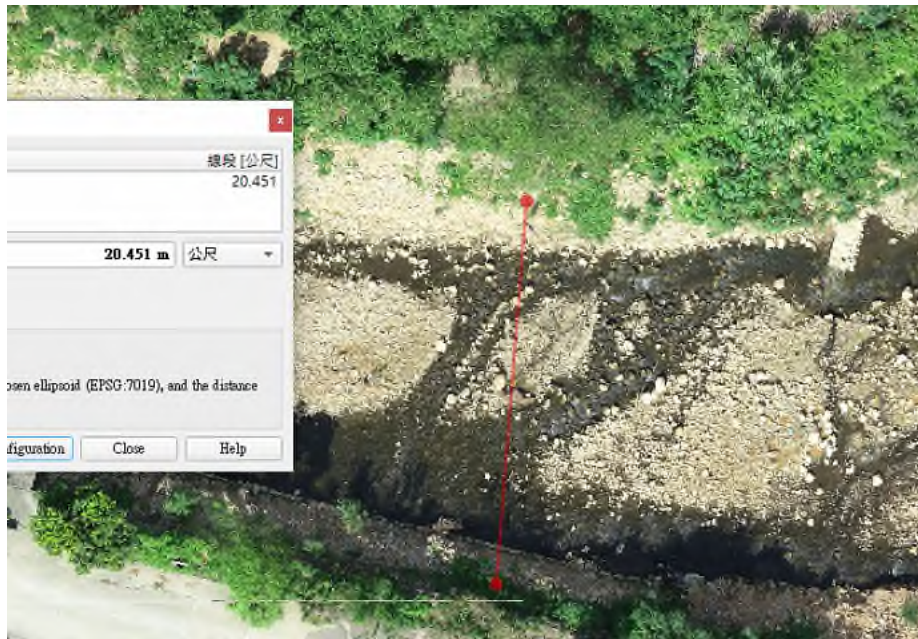


圖 4-33 水仙溪河寬示意圖 1

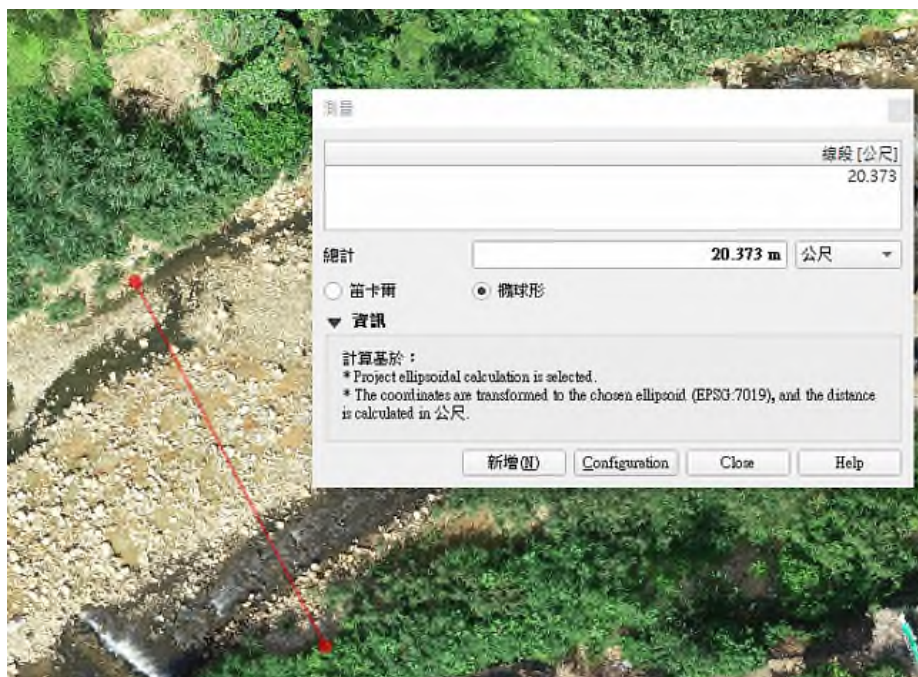


圖 4-34 水仙溪河寬示意圖 2

前期計劃拱型固床工之沖淤探討針對水仙溪河段進行 Courant Number 敏感度分析，將橫軸做為 Courant Number 縱軸為沖淤深度，模擬後的結果進行呈現，三個資料分別為河流橫斷面之左岸(凹岸)、河心中央、右岸，Courant Number 將從 1 降至 0.5，如下圖所示：

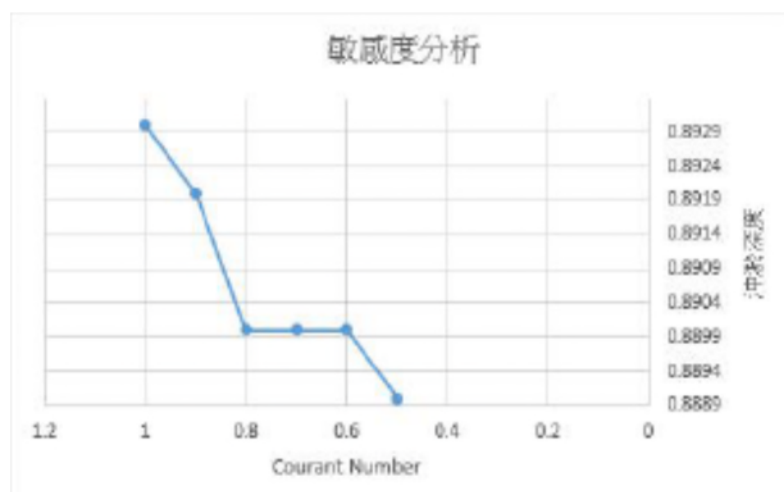


圖 4-35 水仙溪左岸之敏感度分析

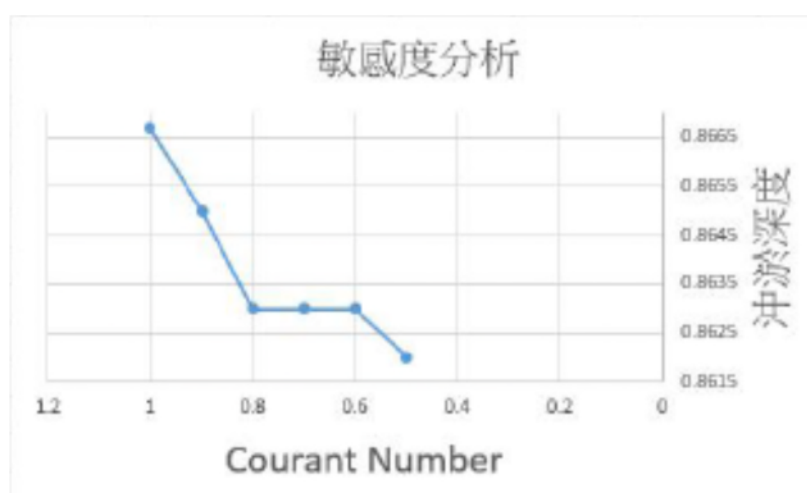


圖 4-36 水仙溪河床中心之敏感度分析

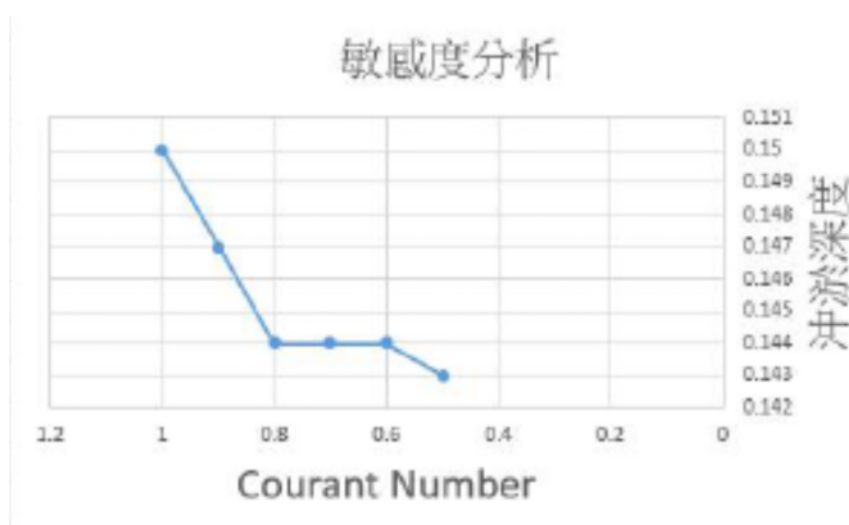


圖 4-37 水仙溪右岸之敏感度分析

由圖 3-15 到圖 3-17 可以發現 Courant Number 由 1 降至 0.8 後，沖淤深度皆趨向穩定，但降至 0.5 時又破壞了穩態，可發現降至 0.5 後開始發散，故本研究範圍水仙溪河段 Courant Number 將採取 0.7 作為模擬參數，而網格部分因河床寬度較為寬闊，無如梗枋溪寬度短需較小網格分析需求，且若使用 1m 網格會有發散可能，因此本研究範圍水仙溪河段網格大小採用 $3m^2$ 較適合。

(三)大溪溪

本研究區域大溪溪河段以現地空拍之空拍圖使用 GIS 量測其河床寬介於為 15-25 m 之間，將其平均後計算得出其平均河床寬度約為 20 m 左右如下圖、圖所示：

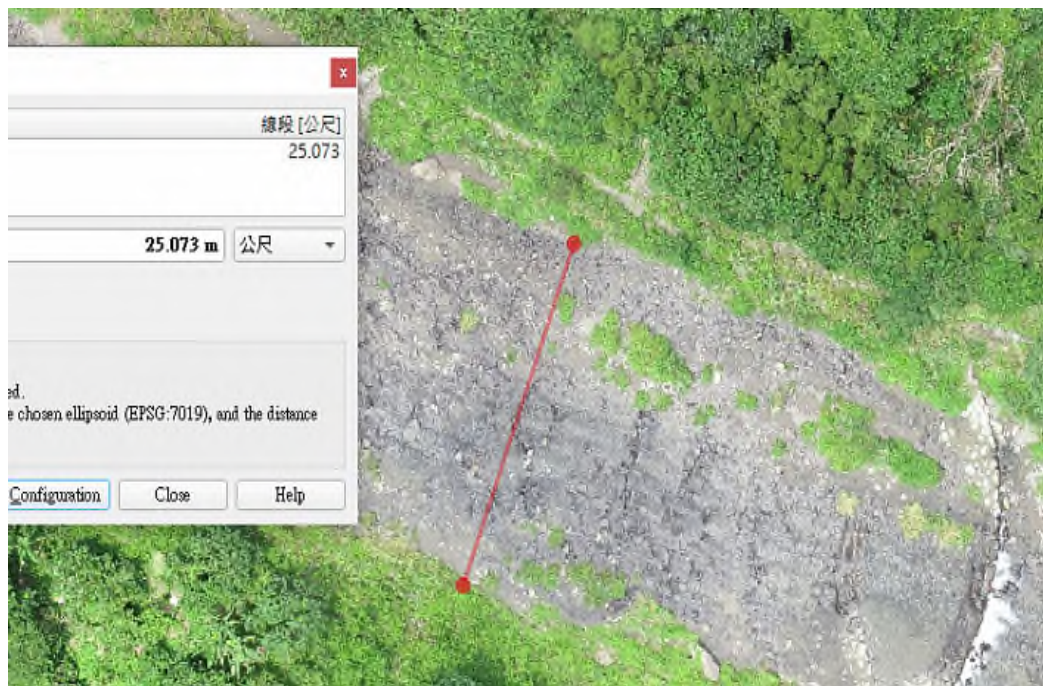


圖 4-38 大溪溪河寬示意圖 1

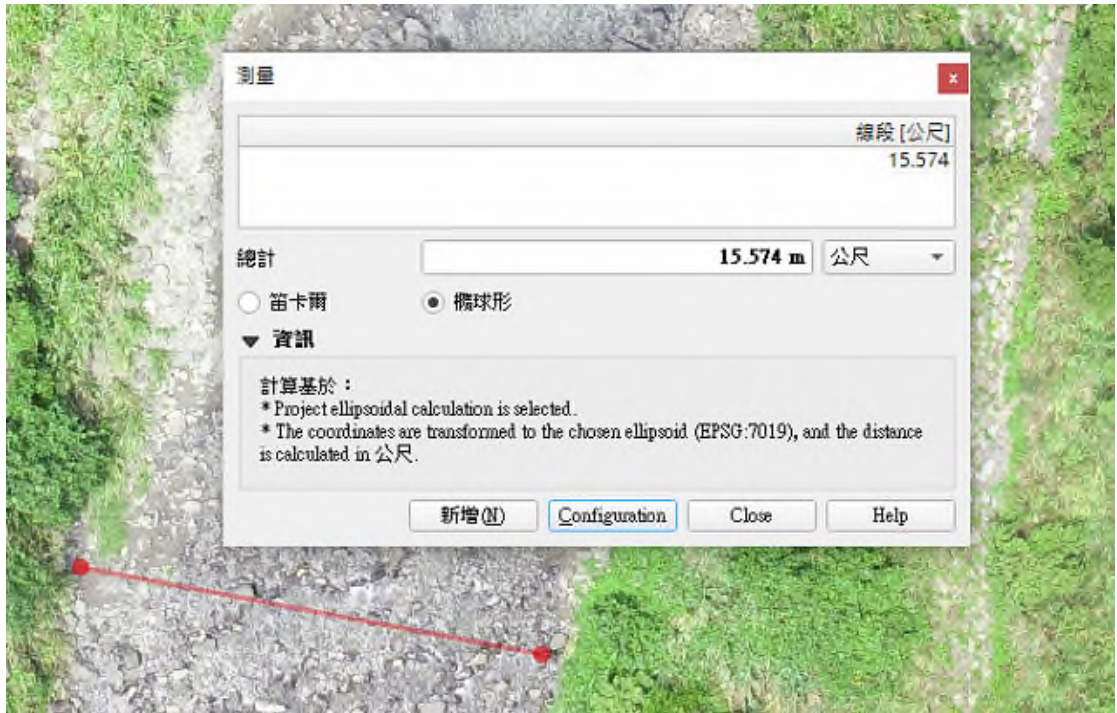


圖 4-39 大溪溪河寬示意圖 2

本研究區域大溪溪河段於大溪溪末端至出海口部分，河床寬度最大值屬於三者之中最為寬闊，但平均河床寬度是與水仙溪相近，且由前兩條溪研究顯示，5 公尺級距之影響並不大幅度改變 Courant Numberup 因子抉擇，因此在 Courant Number 敏感度分析中，本研究河段採取與水仙溪、梗枋南勢溪相同之 0.7；網格大小敏感度分析本研究區域大溪溪則參考與本河段平均河床寬度相同之水仙溪河段網格大小值，最終採取 3 公尺網格作為模式模擬網格大小。

第四節 輸砂公式分析

一、輸砂公式比較

動床輸砂數值模擬時，選取不同輸砂經驗公式推估輸砂量將會導致不同之結果，而不同經驗公式有所適用之範圍及優缺點，為河道沖淤模擬結果情形之一大影響重點因子，因此在進行數值模擬前，必須先選定最適用於研究範圍之輸砂公式下列表為蒐集各輸砂公式試驗範圍之比較分析表：

表 4-11 各輸砂公式試驗範圍之比較分析表

輸砂公式	粒徑 d50(mm)	坡度 S_f	水深H (m)	土壤顆 粒密度 ρ (kg/m ³)	單寬流量 (cms/m)	無因次 臨界剪 應力 θ_{cr}
Meyer- Peter & Muller (1948)	0.4~30	0.0004~0.02	0.01~1.2	2500~3200	0.002~2.3	0.047
Ashida Michiue (1972)	0.3~7.0	0.004~0.02	0.12~0.22	1038~4580	0.000625~0.004	0.05
Engelund and redsøe (1976)	0.3~7.0	0.00131	0.326	2650	0.0236	0.046
Fernandez-Luque and vaneek(1976)	0.9~3.3	0~0.38	0.08~0.12	1340~4580	0.024~0.072	0.05~0.058
Parker fit to	2~10.5	0.01~0.20	0.01~0.09	2670~2680	0.025~0.15	0.032~0.1

Einstein (1979)						
Smart (1984)	2~10.5	0.01~0.20	0.01~0.09	2670~2680	0.025~0.15	0.03~0.047
Nielsen (1992)	0.69~28.65	0.001~0.01	0.01~1.0	1250~4220	0.002~2.3	0.05
Wong1 (2006)	0.317~28.65	0.0004~0.02	0.02~1.2	2500~3200	0.004~3.5	0.048
Wong2 (2006)	0.317~28.65	0.0004~0.02	0.02~1.2	2500~3200	0.004~3.5	0.0495
Camenen-Larson (2005)	0.088~200	0.0004~0.02	0.01~1.2	1140~2660	0.002~2.3	0.04

(一)粒徑

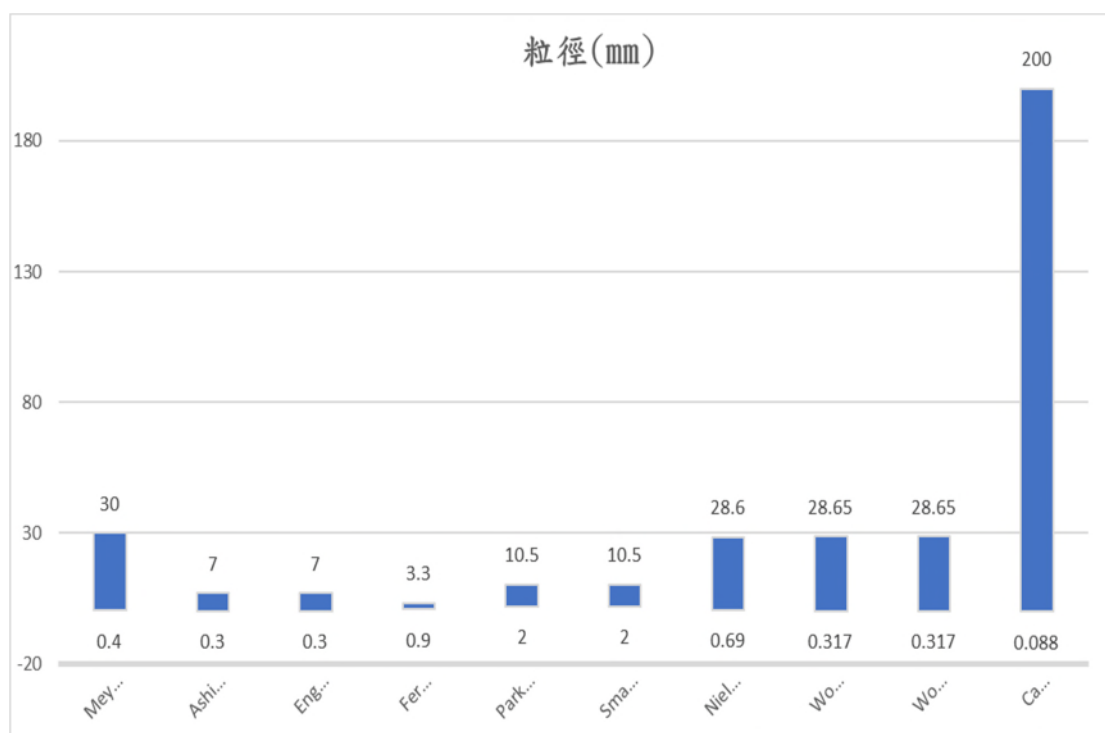


圖 4-40 各輸砂公式粒徑試驗分佈圖

本團隊於梗枋南勢溪之河床質分析結果中值粒徑 D50 約為 23.64 mm，屬於粗粒徑，由上圖圖 4-40 各輸砂公式粒徑分佈圖來看，除了

Camenen-Larson (2005)因為是由比較融合多種輸砂公式修正回歸粒徑分佈較廣外，Ashida Michiue (1972)、Engelund and Fredsøe (1976)、Fernandez-Luque and van Beek (1976)、Parker fit to Einstein (1979)、Smart (1984)，這五種輸砂公式中值粒徑 D50 試驗範圍最大只達到 10.5 mm，離梗枋溪之中值粒徑相差甚大，因此不適合，而 Meyer-Peter & Muller (1948)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson，這五種輸砂公式是較梗枋南勢溪粒徑範圍。

(二)坡度

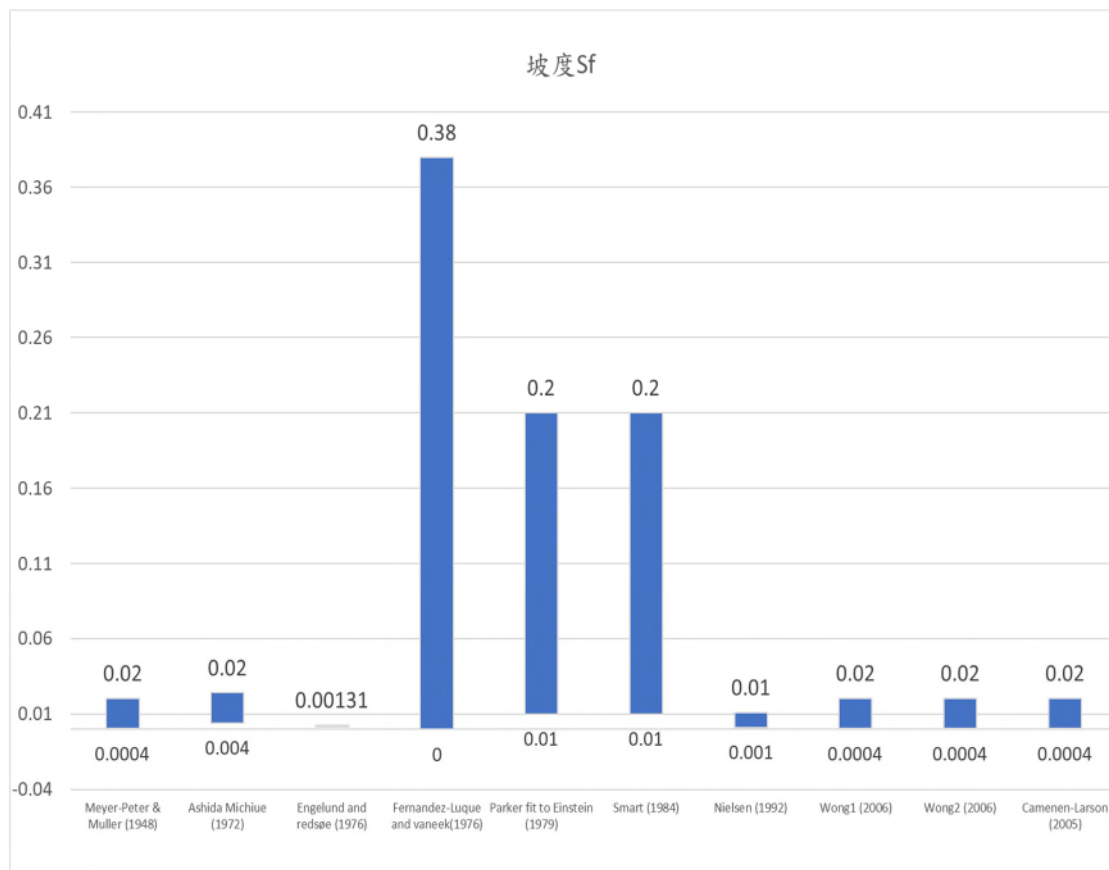


圖 4-41 各輸砂公式坡度試驗分佈圖

本團隊參考梗枋南勢溪下游也溪補強工程中相關工程圖資與實際利用 UAV 空拍所製成之 DSM 計算梗枋南勢溪上下游邊界之高程差與距離計算其坡度值約為 0.04 左右，由上圖 4-41 各輸砂公式坡度

分佈圖可發現 Fernandez-Luque and van Beek (1976)、Parker fit to Einstein (1979)、Smart (1984)，這三種輸砂公式坡度範圍較大，而 Meyer-Peter & Muller (1948)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson，這五種輸砂公式雖然範圍不包含梗枋溪之坡度，但是與梗枋南勢溪之坡度相差甚小，因此將其納入考慮選擇，並輔以其他因子做綜合分析。

(三)水深

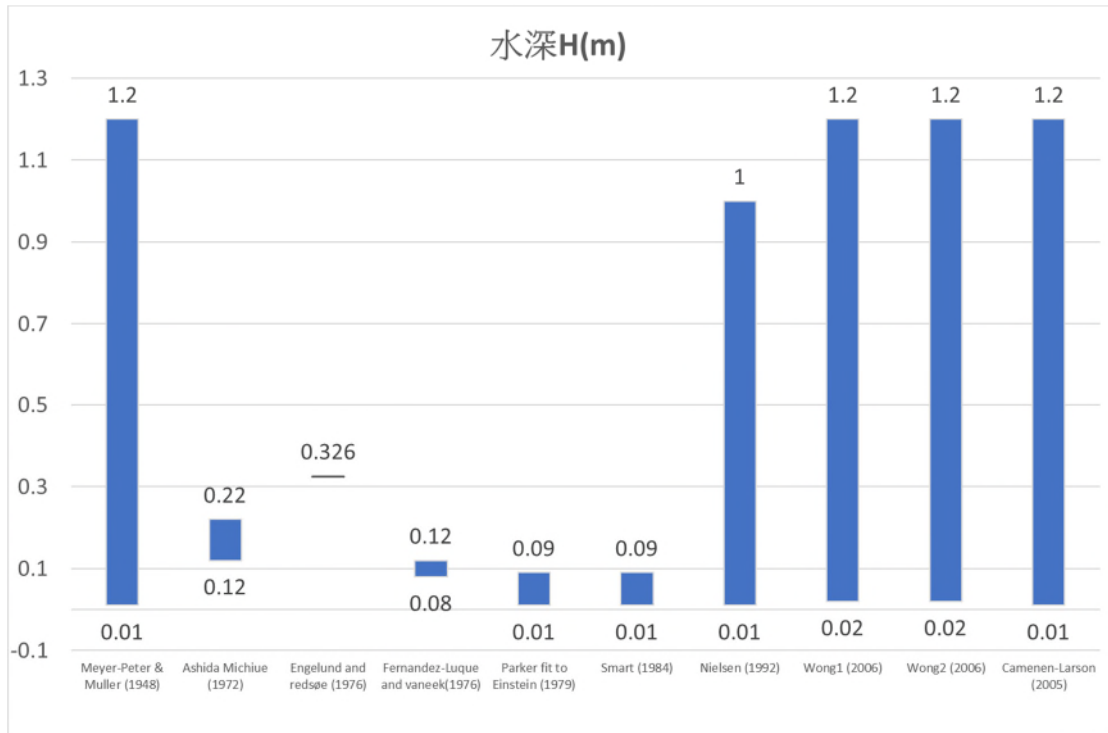


圖 4-42 各輸砂公式水深試驗分佈圖

本團隊以穿越線法實際勘查平均水深，由兩者資料綜合得出梗枋南勢溪平均水深約為 0.2~0.3 m，以上圖 4-42 Ashida Michiue (1972)、Fernandez-Luque and van Beek (1976)、Parker fit to Einstein (1979)、Smart (1984)，四種輸砂公式來看其試驗範圍水深與梗枋南勢溪不符，而 Engelund and Fredsøe 因其試驗範圍固定不適用變動之水深，因此上述五種皆不考慮，在水深方面符合的輸砂公式有 Meyer-Peter &

Muller (1948)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson 五種。

(四) 土壤顆粒密度

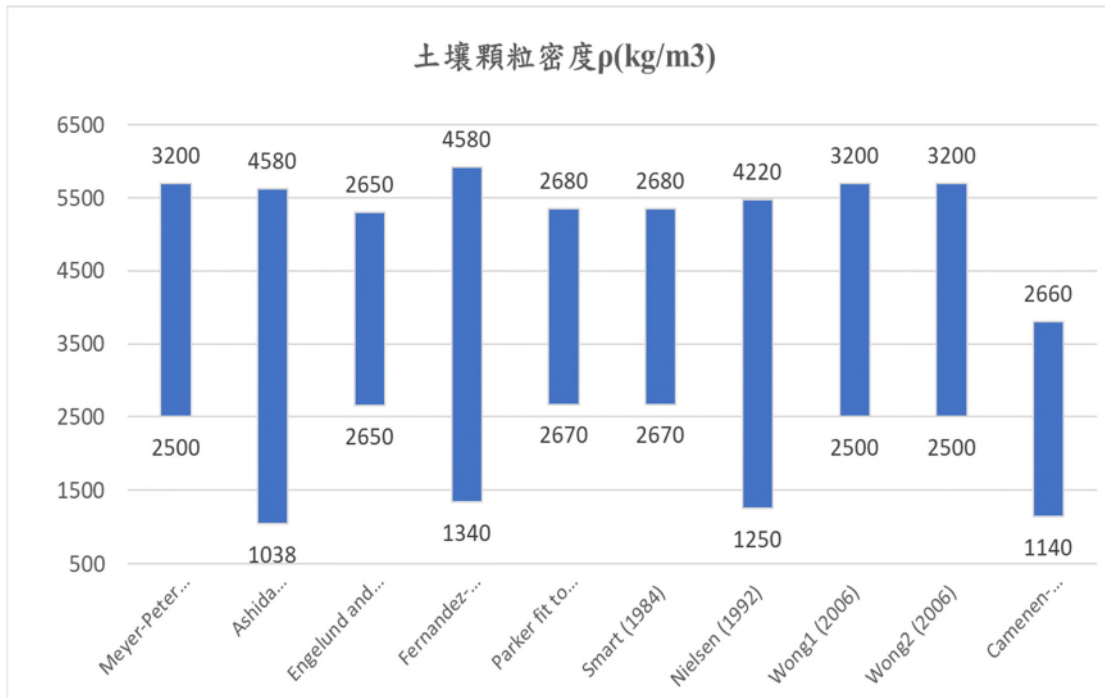


圖 4-43 各輸砂公式土壤顆粒密度試驗分佈圖

本團隊於梗枋南勢溪實地採樣土壤並帶回實驗室進行土壤顆粒密度試驗，得出其土壤顆粒密度為約為 2500 kg/m^3 ，由上圖 4-43 各輸砂公式土壤顆粒密度試驗分佈圖可看出 Engelund and Fredsøe (1976)、Parker fit to Einstein (1979)、Smart (1984) 其試驗最小顆粒密度值皆大於梗枋南勢溪之土壤顆粒密度，而較符合梗枋南勢溪土壤顆粒密度之輸砂公式為 Meyer-Peter & Muller (1948)、Ashida Michiue (1972)、Fernandez-Luque and van Beek (1976)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson (2005) 等七種輸砂公式。

(五)單寬流量

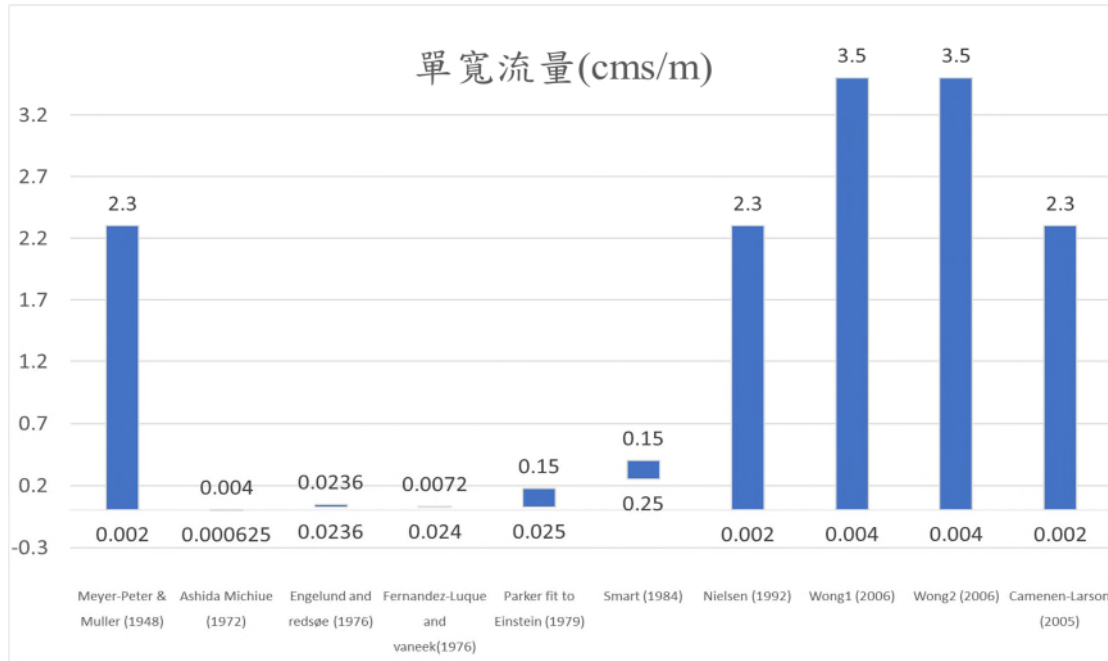


圖 4-44 各輸砂公式單寬流量試驗分佈圖

本團隊於下游邊界條件之出流量設計採取依據臨界流流況福祿數等於 1，並實際至現地量取固床工斷面形狀數值，使用堰流公式推算流量，計算出其單寬流量約為 0.36 (cms/m)，由上圖 4-44 輸砂公式單寬流量試驗分佈圖可發現 Ashida Michiue (1972)、Engelund and Fredsøe (1976)、Fernandez-Luque and van Beek (1976)、Parker fit to Einstein (1979)、Smart (1984)，這五種輸砂公式之試驗單寬流量皆較小，不符合梗枋南勢溪之單寬流量，而而 Meyer-Peter & Muller (1948)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson，這五種輸砂公式較符合梗枋南勢溪之單寬流量。

(六)無因次剪應力

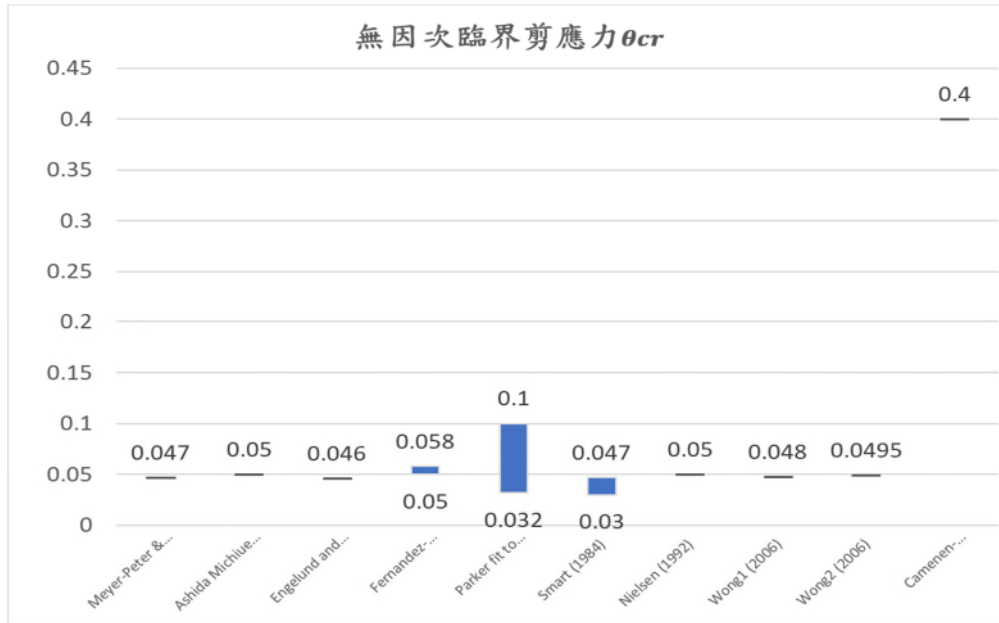


圖 4-45 各輸砂公式臨界剪應力試驗分佈圖

本團隊將參考 Singh and Thompson (2016) 文獻，文獻中提到土壤無因次剪應力與含水量之相關公式為

$$\tau_c = 0.97e^{0.04w}$$

式中 e 為自然常數， w 為含水量，河床之無因次臨界剪應力係以泥砂啟動時的水流狀況，因此以採樣當時的含水量作為參數，本團隊於梗枋南勢溪實地採樣土壤並帶回實驗室進行試驗，取得土壤含水量，並代入上式求得其無因次臨界剪應力為 0.993，由上圖 4-45 各輸砂公式臨界剪應力試驗分佈圖可發現只有 Parker fit to Einstein(1979)，較符合，但多種輸砂公式之回歸式皆只有固定值之無因次臨界剪應力，且 Singh and Thompson (2016) 公式之試驗以粉粒為主，與本研究區域不同，因此將其納入考慮選擇，並輔以其他因子做綜合分析。

綜觀上述所由粒徑、坡度、水深、土壤顆粒密度、單寬流量、無因次臨界剪應力之六項各輸砂公式試驗因子，其中 Ashida Michiue

(1972)、Engelund and Fredsøe (1976)、Smart (1984)皆只有一項因子符合梗枋南勢溪，Ashida Michiue (1972)為土壤顆粒密度、Engelund and Fredsøe (1976)為水深，Smart (1984)為坡度，而 Fernandez-Luque and van Beek (1976)與 Parker fit to Einstein (1979)也只有兩項因子符合梗枋南勢溪，分別為坡度、土壤顆粒密度與無因次臨界剪應力、土壤顆粒密度，因此將不考慮 Ashida Michiue (1972)、Engelund and Fredsøe (1976)、Fernandez-Luque and van Beek (1976)、Parker fit to Einstein (1979)、Smart (1984)，這五種輸砂公式。

而 Meyer-Peter & Muller (1948)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson 另五種輸砂公式符合之因子有四項，分別為粒粒、水深、土壤顆粒密度、單寬流量，且在坡度方面與梗枋南勢溪之數值相距不大，將上述水文、地文條件與輸砂公式比較後，本研究將選出上述五種輸砂公式 Meyer-Peter & Muller (1948)、Nielsen (1992)、Wong1 (2006)、Wong2 (2006)、Camenen-Larson 進一步以 2 年重現期距之暴雨進行 RiverFlow 2D 模式數值模擬，分別將以整體沖淤趨勢圖與沖淤面積、體積進行探討，最後選出最適合梗枋南勢溪之輸砂公式，以供後續模擬使用。

二、沖淤趨勢圖探討

(一) Meyer-Peter and Mueller (1948)

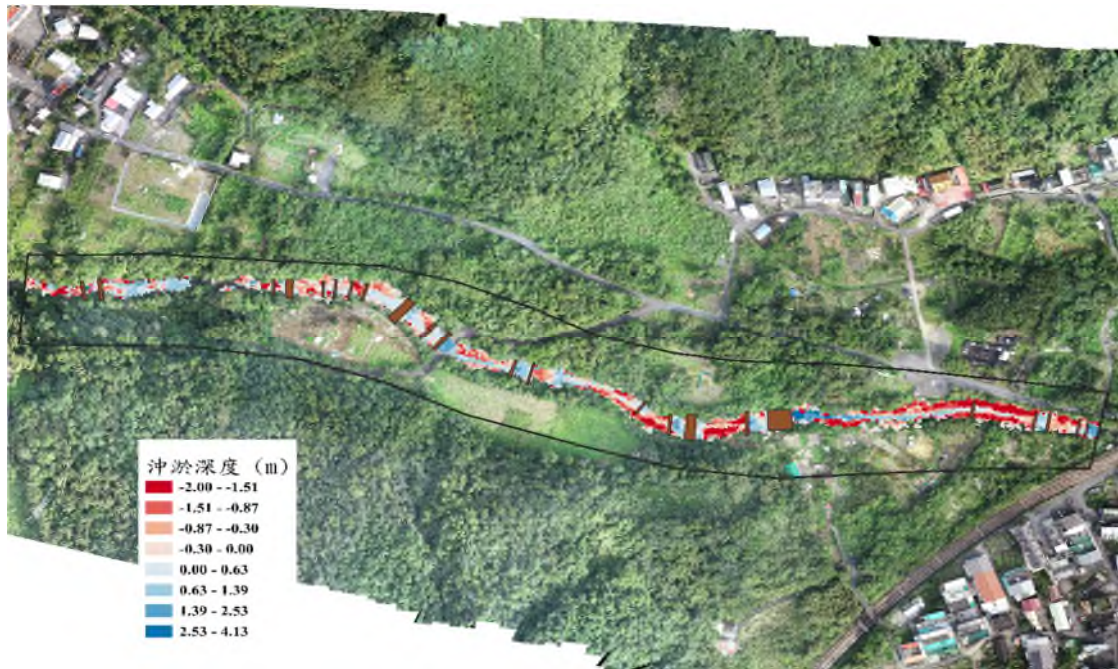


圖 4-46 Meyer-Peter and Mueller 沖淤趨勢圖

(二) Nielsen (1992)

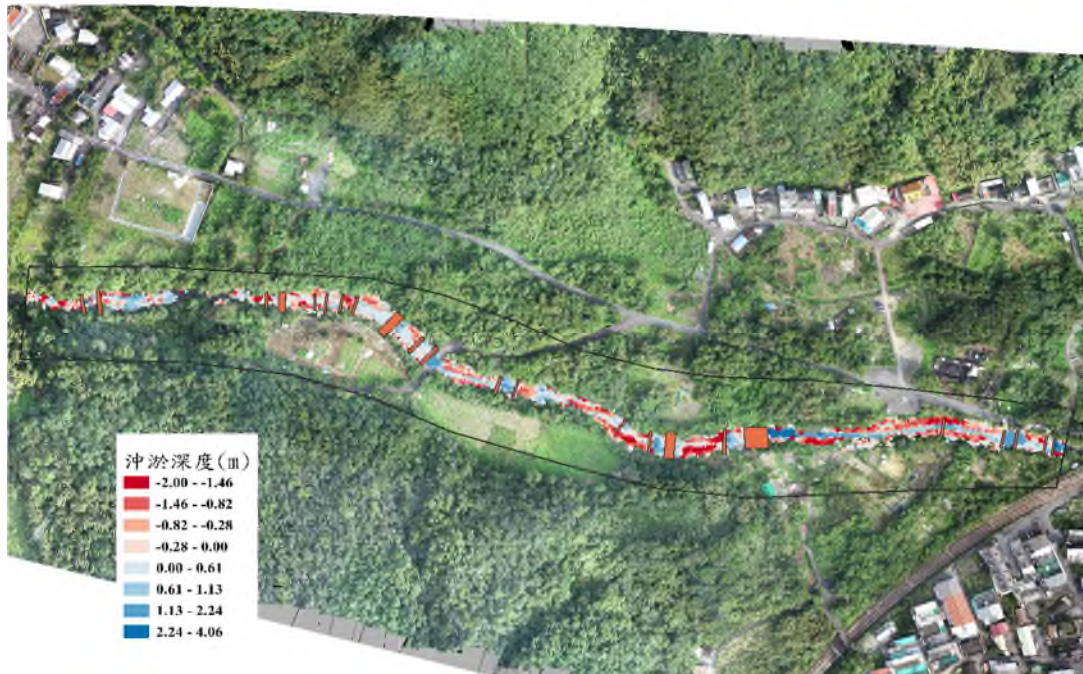


圖 4-47 Nielsen 沖淤趨勢圖

(三) Camenen and Larson (2005)

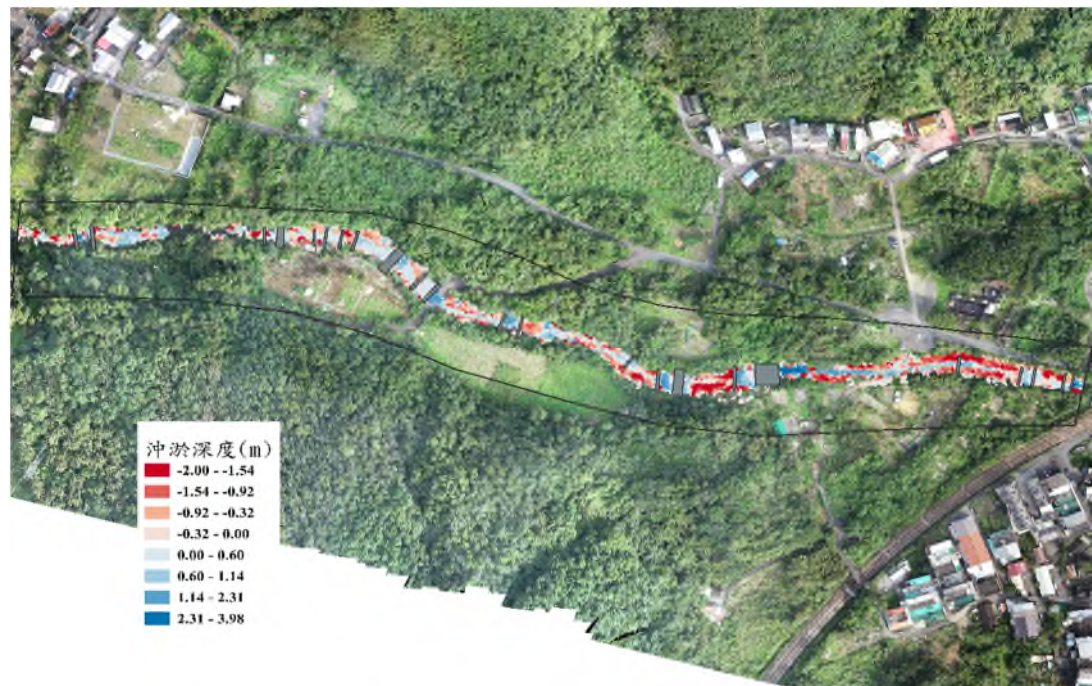


圖 4-48 Camenen and Larson 沖淤趨勢圖

(四) Wong1(2006)

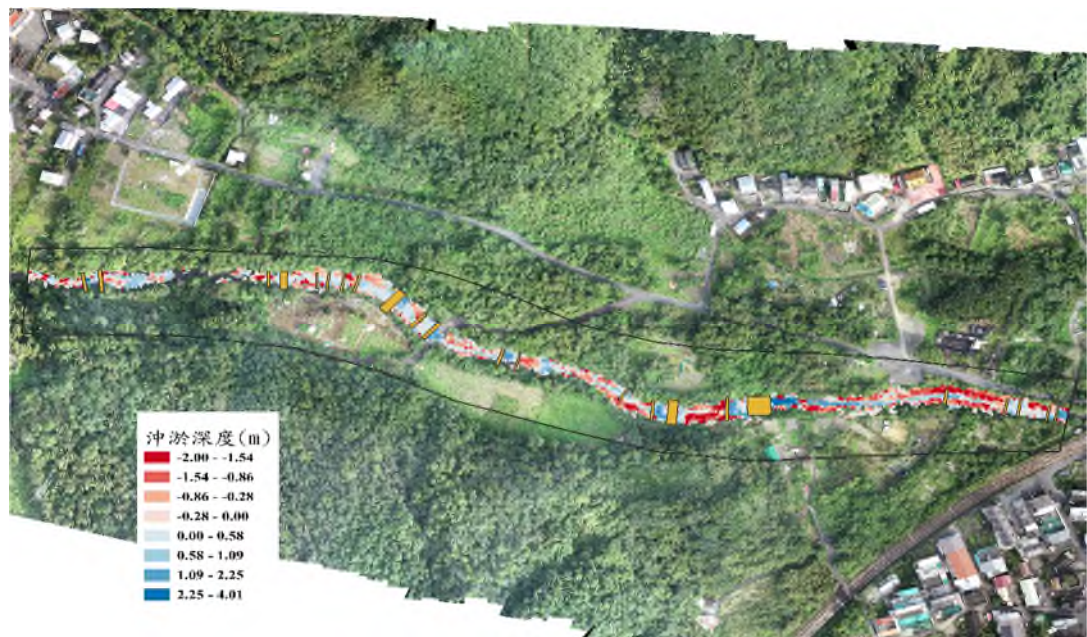


圖 4-49 Wong1 沖淤趨勢圖

(五) Wong2(2006)



圖 4-50 Wong2 沖淤趨勢圖

由上述五種輸砂公式之沖淤趨勢圖中可發現適用於粗粒徑之輸砂公式之沖淤情形差異並不會到太大，但本次模擬之流量使用 2 年重現期距之暴雨量，以梗枋南勢溪近幾年雨量資料與溪床現場情況來看輸砂公式—Nielsen，對於河床之沖刷部分過甚，甚至多出其它四種公式甚多，因此在沖刷條件下 Nielsen 並不適用於本研究區域梗枋南勢溪。

然而其餘輸砂公式中，Wong1 及 Wong2，是由 Meyer-Peter and Müller 重新分析衍生而來，其差別在於回歸公式中乘上之校正因子不同，以目前梗枋南勢溪所遇到的伏流、斷流問題以及空拍照片與現勘所得到之資訊來看，若模擬結果中 Camenen and Larson、Meyer-Peter and Müller 及其衍生公式沖淤情勢差異不大，那麼以現場狀況判斷，從 2006-2014 年梗枋溪固床工野溪治理工程完工後，其雨後淤積情形日漸擴大，在五種輸砂公式趨勢圖中，以 Meyer-Peter and Müller 之淤積部分最大，是屬於淺沖深淤型式，也較符合梗枋南勢溪之粗粒徑沖

刷型式，且若以本團隊所蒐集到之各參數，針對梗枋南勢溪土壤所實驗之輸砂模組參數來看，其中包括中值粒徑 D50、土壤顆粒密度、孔隙率..等等，Meyer-Peter and Müller 試驗中所適用之範圍是最符合本研究區域梗枋南勢溪，因此本研究將採用 Meyer-Peter and Müller 作為模式輸砂公式之選定。

三、 沖淤面積體積探討

對於要選適合梗枋南勢溪之輸砂公式除了從大範圍沖淤趨勢圖來看，本研究也將利用地理資訊系統結合模式套疊圖層計算出各輸砂公式所模擬出之結果，其中包括總沖刷面積、總淤積面積、為變化區面積、總沖刷體積、總淤積體積以及最後所得之淨體積變化量，將結果已詳細數字資料方式交互比對，在結合整體沖淤趨勢圖更能判斷出所適用之輸砂公式，下列表 4-12 將列出 RiverFlow 2D 各輸砂公式模擬結果資料：

表 4-12 不同輸砂公式模擬結果

RiverFlow 2D 模擬結果						
模式 輸砂公式	總沖刷 面積 (m^2)	總淤積 面積 (m^2)	未變化區 面積 (m^2)	總沖刷 體積 (m^3)	總淤積 體積 (m^3)	淨體積變化 量 (m^3)
Meyer-Peter and Mueller (1948)	4537.38	4718.7	52725.67	3638.71	3331.221	-307.49
Nielsen (1992)	5225.71	4123.18	52632.85	4747.81	2728.609	-2019.2
Wong1(2006)	4577.81	4537.15	52866.76	3784.34	2872.252	-912.092
Wong2(2006)	4568.69	4498.23	52834.81	3772.9	2891.372	-881.525
Camenen and Larson (2005)	4683..66	4545.70	52752.37	3814.78	2888.298	-926.484

先從總沖刷面積來看，輸砂公式中除了 Nielsen 面積超過 5000 m^2 外，其餘輸砂公式皆在 4500 m^2 左右差異不大，接著將沖刷面積乘以沖刷深度可得出總沖刷體積，由資料顯示 Nielsen 之總沖刷體積達到了 4747.81 m^3 ，明顯高出其他四種輸砂公式許多，因此將不考慮 Nielsen 之輸砂公式。

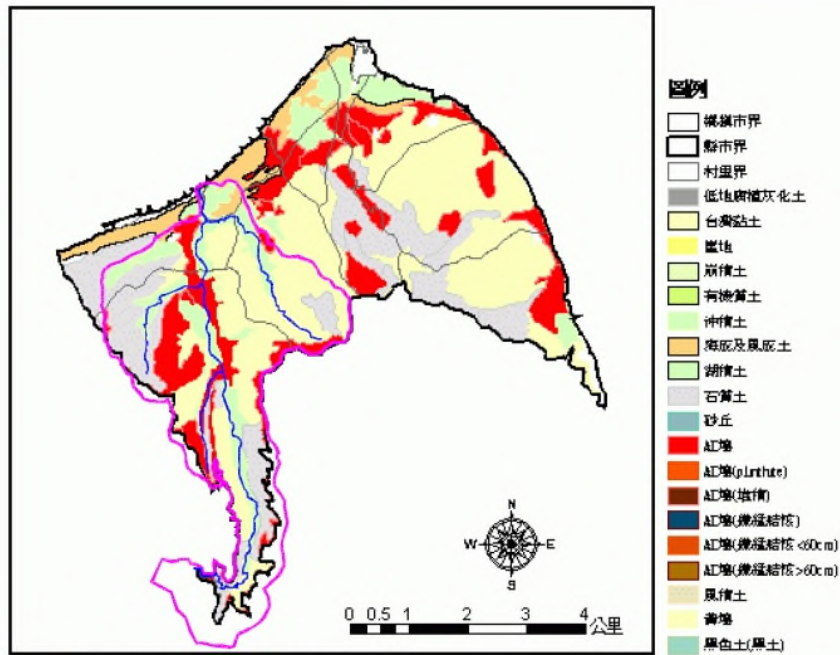
而從未變化區面積則是五種輸砂公式皆相近，可以發現在梗枋南勢溪不沖不淤之地帶明顯，表示若日後之沖刷、淤積地帶將會更加顯著，而從總淤積面積來看其餘四種輸砂公式之淤積面積是差異不大的，但是乘以淤積深度後卻可以發現，Wong1、Wong2、Camenen and Larson 都屬於淺淤型態，只有 Meyer-Peter and Mueller 較符合梗枋南勢溪近年來因下游固床工野溪工程的緣故大量淤積而產生之伏流、斷流問題，最後也可由淨體積變化量來看，Wong 之輸砂公式試驗時不考慮混和粒徑(隱藏因子=0)，因此為淺沖淺淤，無法呈現梗枋溪近期型態，而 Meyer-Peter and Mueller 考慮了混和粒徑，其淤積型態驗證了梗枋溪之淤積問題，因此本研究最後結合了沖淤情勢圖、沖淤面積、沖淤體積探討，將選定 Meyer-Peter and Mueller 作為二維水理輸砂模式 RiverFlow 2D 模擬梗枋南勢溪情境數值模擬選用之輸砂公式。

四、三樣區之輸砂公式分析

選定輸砂公式最重要的因子不外乎是樣區土壤粒徑以及樣區地形坡度，根據上述探討結果可以得知 Meyer-Peter and Mueller 輸砂公式考慮了混和粒徑，其淤積型態驗證了梗枋溪之淤積問題，因此被選定作為二維水理輸砂模式 RiverFlow 2D 模擬梗枋南勢溪情境數值模擬選用之輸砂公式。

以下亦針對本計畫所選定的三個樣區做一個土壤、地形資料之彙整比較，如表 4-13 所示。

梗枋南勢溪根據現場河床質採樣之結果，量測出其土壤顆粒密度 2500 kg/m^3 、中值粒徑 D_{50} 為 2.75cm 、樣區坡降為 4.0% 。水仙溪根據縣(市)管河川水仙溪水系規劃報告，此處由於雨量充沛，分布均勻，終年淋洗土壤作用盛行，同時因矽酸向下移動，遺留大部分之鐵鋁氧化物，使土壤多呈棕紅色或棕黃色，即計畫區常見之紅棕壤或黃棕壤，此類型土壤顆粒密度約落在 $2200\text{-}2800 \text{ kg/m}^3$ ，中值粒徑採 10cm ，如圖 4-51；樣區坡降則配合工程圖採用 2.7% 作為影響因子，如圖 4-52、圖 4-53 所示。



資料來源：1.新北市政府全球資訊網。
2.本計畫整理。

圖 4-51 新北市境內土壤分布狀況圖

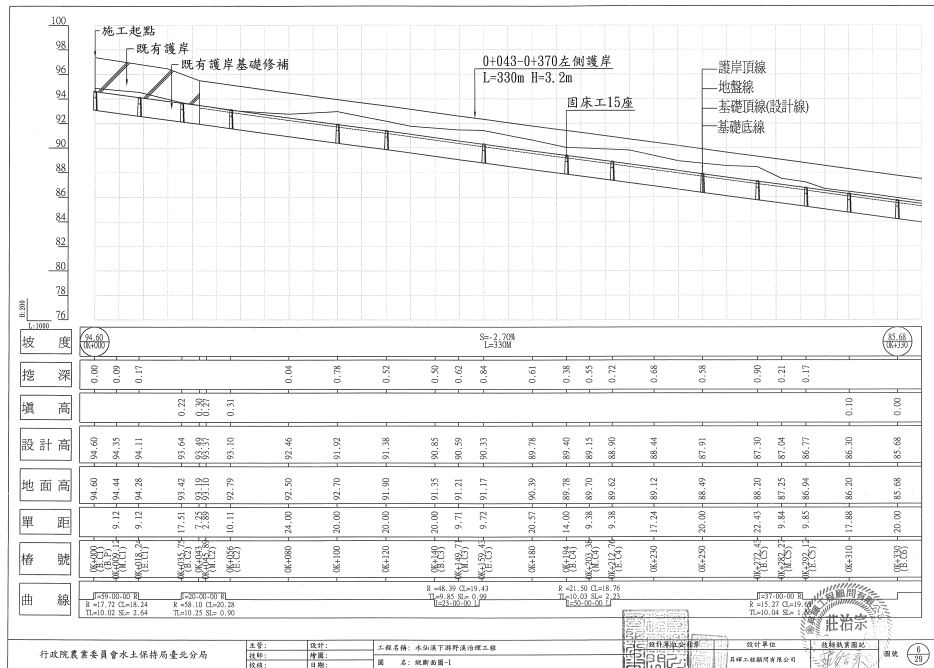


圖 4-52 水仙溪下游野溪治理工程圖 1

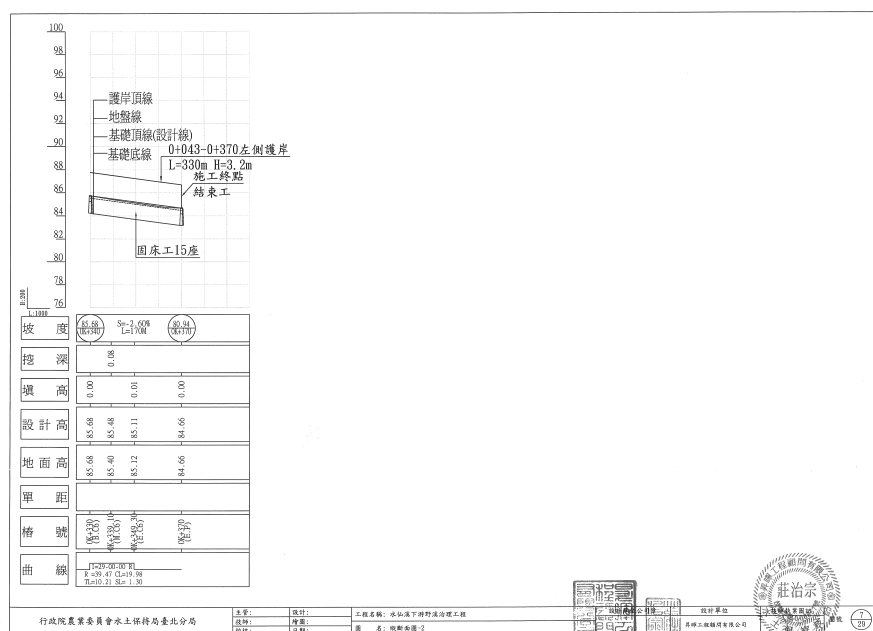


圖 4-53 水仙溪下游野溪治理工程圖 2

大溪溪則根據頭城沿海集水區大規模土砂模式及觀測評估報告書，其說明了大溪溪集水區範圍內土壤包含幼黃壤及黃壤等二種性質，如圖 4-54 所示，並採用 2500 kg/m^3 作為其土壤顆粒密度， 7.67 cm 作為中值粒徑 D_{50} ；樣區坡降部分亦根據工程圖進行計算，採用 2.0% 作為輸砂公式之判斷因子。



一個級距內，因此，可將其視為輸砂條件相同，於選定輸砂公式之時皆選用 Meyer-Peter and Mueller 作為二維水理輸砂模式 RiverFlow 2D 之用。

表 4-13 三樣區土壤地形資料之比較

	梗枋南勢溪	水仙溪	大溪溪
土壤顆粒密度(kg/m^3)	2500	2200-2800	2500
中值粒徑 D50(cm)	2.75	10.0	7.67
樣區坡降	4.0%	2.7%	2.0%
選用之輸砂公式	Meyer-Peter and Mueller	Meyer-Peter and Mueller	Meyer-Peter and Mueller

第五節 資料彙整與結論

在敏感度分析與輸砂公式皆選定後，最後要進行的是間距範圍分析並將成果資料彙整，即可進行不同範圍間距對於泥砂沖淤之數值模擬，而不同重現期距流量下所選定的不同間距將會影響模擬結果，本團隊將針對研究區域進行不同間距範圍分別進行兩組不同重現期距流量模擬分析，進而進行後續不同間距範圍對泥沙沖淤之影響。

一、梗枋南勢溪

為了取出不同間距，本研究參考文獻梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說資料，將梗枋南勢溪以坡度因子劃分區間，而資料中可以發現梗枋南勢溪在 23 隻固床工中大致可以劃分為三段坡度，分別為離上游邊界條件最近之第 23 號固床工至第 15 號固床工、第 15 號固床工至 6 號固床工、第 15 號固床工至第 6 號固床工、第六號固床工至離下游邊界最近之第 1 號固床工如下圖 4-57~圖 4-59 所示：

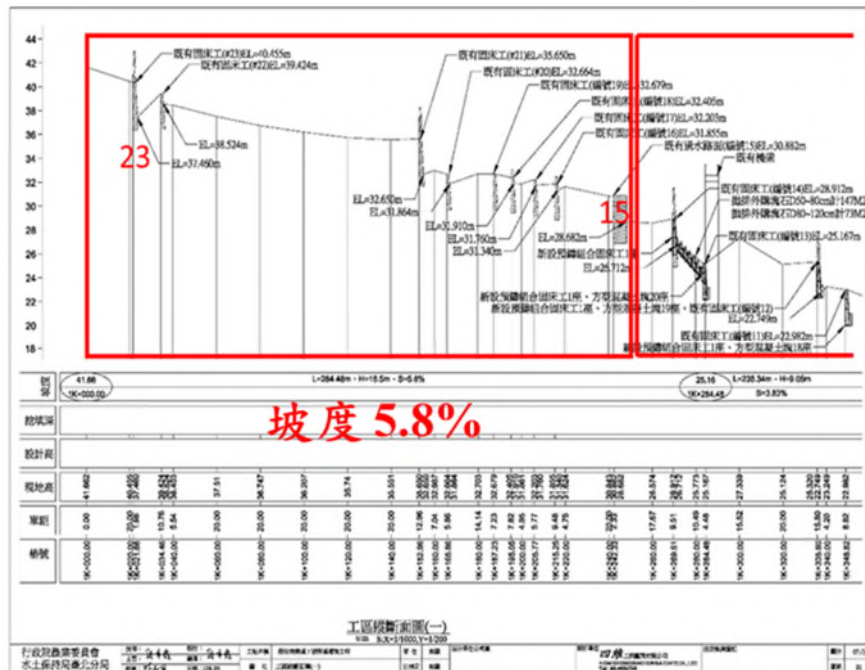


圖 4-57 梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說 1

系列固床工間距對泥砂沖淤之數值模擬探討

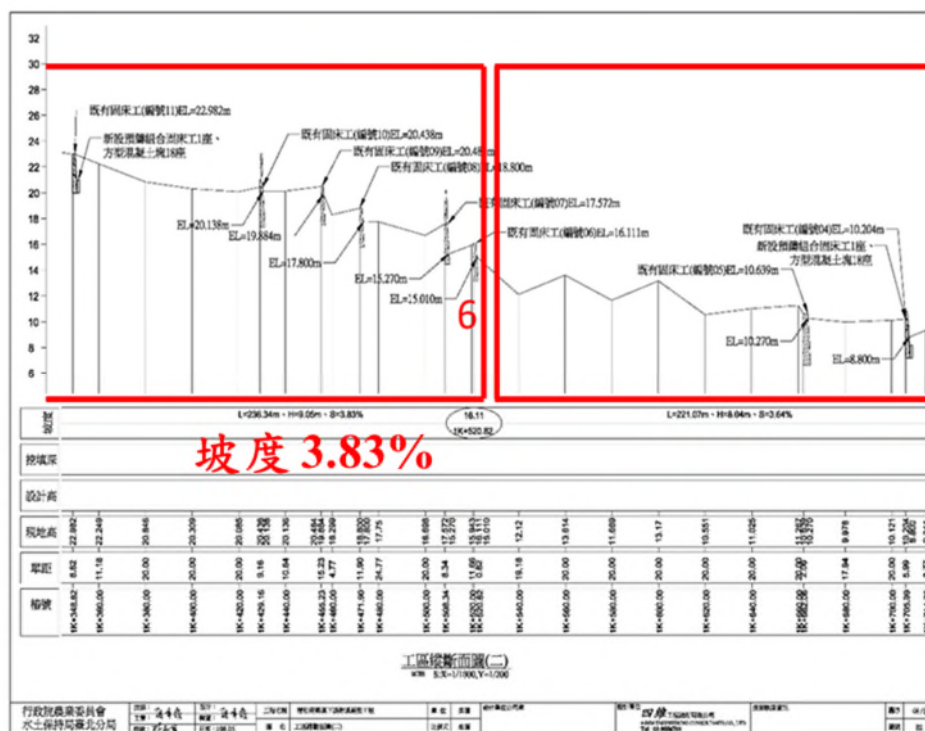


圖 4-58 梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說 2

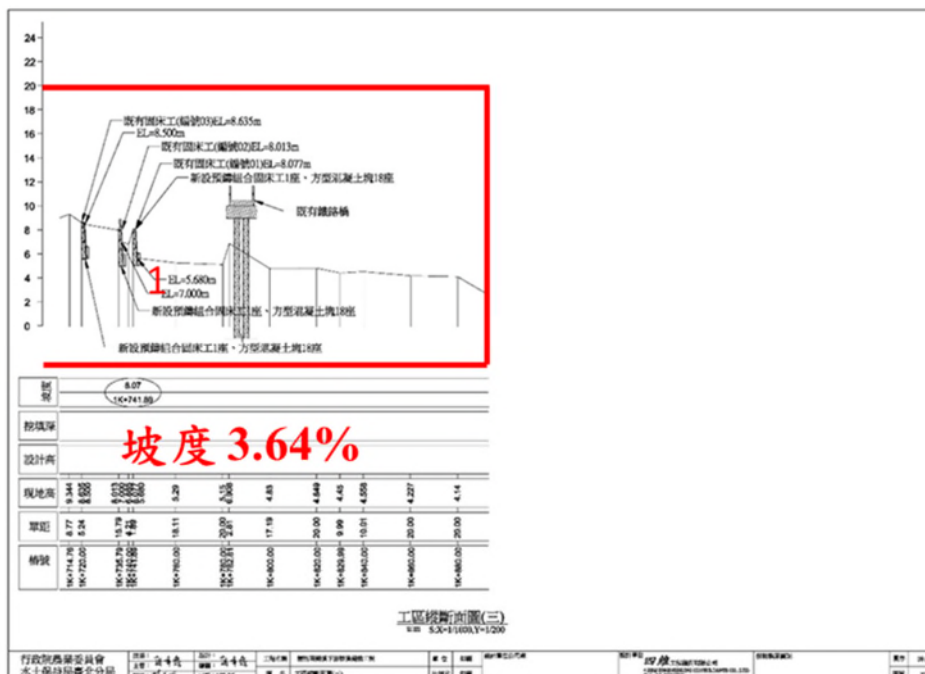


圖 4-59 梗枋南勢溪下游野溪補強工程圖說 3

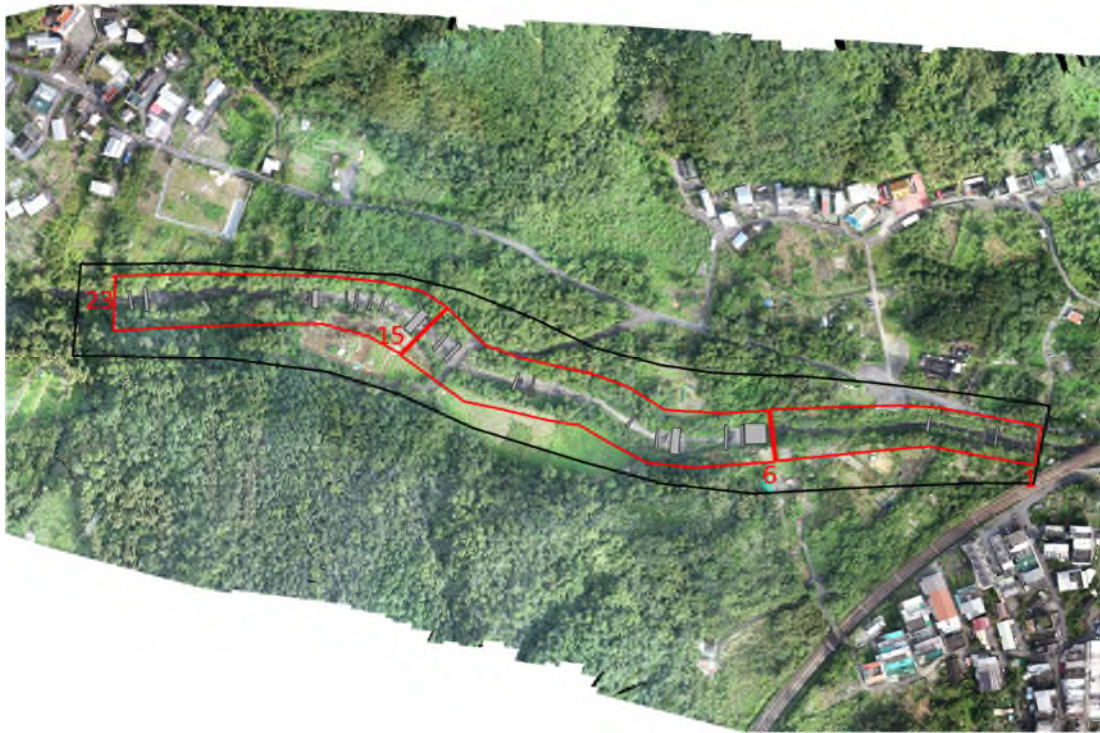


圖 4-60 梗枋南勢溪三段間距範圍

本段將針對這三段坡度因子設定三種模擬間距範圍分別為 1~23 號固床工間距範圍、1~15 號固床工間距範圍、1~6 號固床工間距範圍，以這三種不同間距範圍對研究區域 1 號至 2 號固床工斷面的影響進行模擬圖分析與沖淤面積比分析，再配合兩種重現期距之降雨共六組模擬情況以探討不同間距範圍改變對同一個斷面(1~2 斷面)之泥沙沖淤情況，而兩種重現期距是集水區水文分析中提到的雨量推估成流量歷線，第一種為 2 年重現期距暴雨量，為情境模擬近年暴雨沖淤情況而選用，另一種則為 50 年重現期距暴雨量，為水土保持技術規範中所訂定之水工構造物強度規範。

(一) 2 年重現期距不同間距範圍比較

1. 沖淤模擬圖

為了比較三種間距範圍變化，本研究將沖淤深度範圍區間調至相同，且範圍 1~23 號與範圍 1~15 號將呈現 1~6 號區段之範圍，而沖刷

區段分別為-2~-1.71(m)、-1.71~-1.23(m)、-1.23~-0.72(m)、-0.72~-0.22(m)、-0.22~0(m)，而淤積區端分別為 0~0.72(m)、0.72~1.73(m)、1.73~4.76(m)，為下列圖 4-61~圖 4-63。



圖 4-61 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-6 號沖淤圖



圖 4-62 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-15 號沖淤圖(1-6 號區段)



圖 4-63 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-23 號沖淤圖(1-6 號區段)

由模擬結果圖圖 4-61 可以看出區段 1-6 號因固床工作作用下，上游因沖刷所帶來的泥沙量在此淤積，因此不管整區段或是 1~2 號斷面暴雨所帶來之影響皆是淤積大於沖刷，與梗枋南勢溪面臨現況符合，而圖 4-62 與圖 4-63 在 1-6 號區段差異不大，圖 4-63 沒有因上游範圍擴大而帶來更多泥沙淤積，其主要原因是因為 15~6 號固床工區段與 6~1 號固床工區段坡度相似，而 23~15 號固床工區段坡度則較 15~6 號固床工區段與 6~1 號固床工陡峻，因此 23~15 號固床工區段所沖刷之泥沙多停留在 15~6 號區段，如下，圖 4-64、圖 4-65 所示：

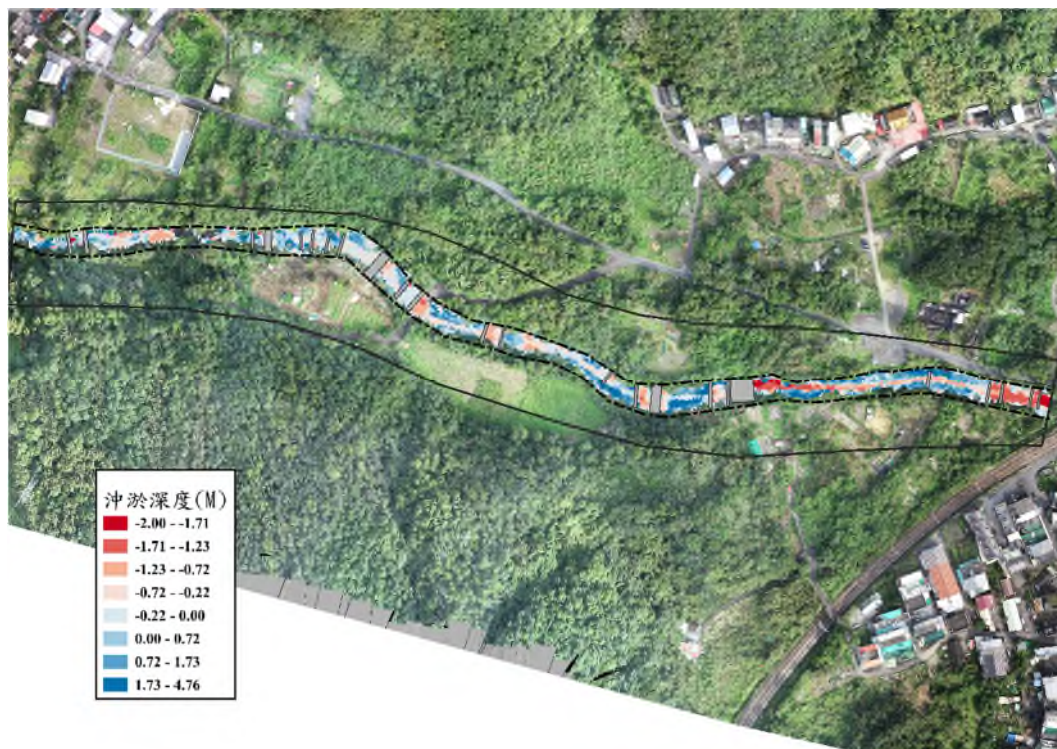


圖 4-64 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-23 號沖淤圖



圖 4-65 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-15 號沖淤圖

由兩張模擬圖之 15~6 號區段可以發現，圖 4-65 中之沖刷部分較圖 4-64 沖淤部分來的小，而淤積部分也較圖 4-64 來的多，因此驗證如同上述所說的 23~15 號固床工區段所沖刷之泥沙多停留在 15~6 號區段，導致圖 4-65 之 1-6 號區段的淤積並不多，沖刷部分也與圖 4-64 之 1-6 號區段差不多。

2. 沖淤模擬面積比

為了更精確的得知不同間距範圍對於同一斷面(1~2 斷面)的泥砂沖淤情況，本研究將 1~2 斷面所生成之網格總面積算出，並將 8 個沖淤區段與不沖不淤區段的個別面積算出，並將其除以總面積得出沖刷或淤積所占總面積比，並繪製成圖表如下：

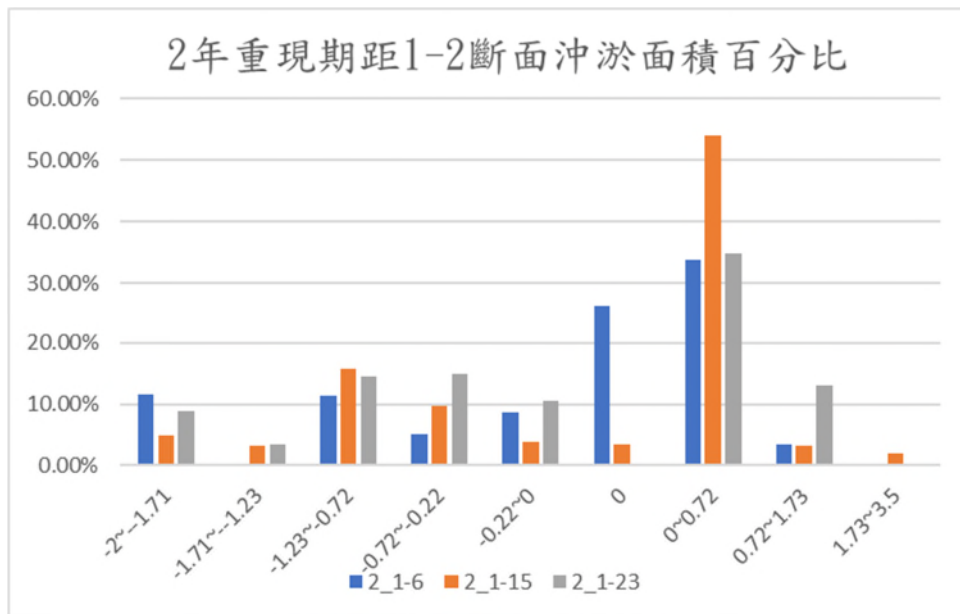


圖 4-66 梗枋南勢溪 2 年重現期距 1-2 斷面沖淤面積百分比

藍色條為 2 年重現期距 1-6 號固床工(1-2 斷面)沖淤分佈面積百分比，可以發現沖刷部分在大沖刷區間比例是比較高的，而不沖不淤部分也是三者中最高的，一部分原因是因為先前提到的由於範圍小，

上游沖刷所帶來的泥沙量少，較其餘兩者沖淤平衡，而另一部分則是因範圍小，河心之淤積量小，因此沖刷聚集於核心，與另外兩者河心淤積後往河流兩岸沖淤之情況不同；橘色條為 2 年重現期距 1-15 號固床工(1-2 斷面)沖淤分佈面積百分比，可以發現相較於 1-6 號，沖刷部分由大沖刷轉移至小沖刷，不沖不淤部分也減少相當多，而比重較大部分則在 0~0.72 小淤積部分；灰色條為 2 年重現期距 1-23 號固床工(1-2 斷面)沖淤分佈面積百分比，可以發現在沖刷部分較 1-15 號更為均衡，也無不沖不淤部分，淤積部分也不像 1-15 號佔較大百分比，而是更平均分佈於 0~0.072 與 0.72~1.73 之間，但淤積百分比總體如先前提到的，23~15 號固床工區段所沖刷之泥沙多停留在 15~6 號區段，並無明顯增長。

在縱觀三個範圍之沖淤模擬圖與沖淤面積百分比後，可以看出 1-23、1-15、1-6 間距各有其不同泥沙沖淤型態，設計時須注意不同間距沖淤情勢才能應對不同泥沙沖淤情況，而以兩年重現期距來看，為避免 2 號固床工下游過度沖刷以及 1 號固床工上游過度淤積情況，以所設定之三種間距看來，固床工間距從 1 號至 23 號間距範圍沖淤較均衡是適合梗枋南勢溪常見暴雨情況，後續將會以其它不同樣區更進一步進行比較分析。

(二)50 年重現期距不同間距範圍比較

1. 沖淤模擬圖

50 年重現期距流量也是以三種範圍間距做為模擬區段，同樣沖淤深度範圍區間調至相同，且範圍 1-23 號與範圍 1-15 號將呈現 1-6 號區段之範圍，而沖刷區段分別為-2~-1.46(m)、-1.46~-0.82(m)、-0.82~-

0.27 (m)、-0.27~0 (m)，而淤積區端分別為 0~1.08(m)、1.08~2.01(m)、2.01~3.23(m)，3.23~5.51(m)，為下列圖 4-67~圖 4-69：



圖 4-67 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-6 號沖淤圖

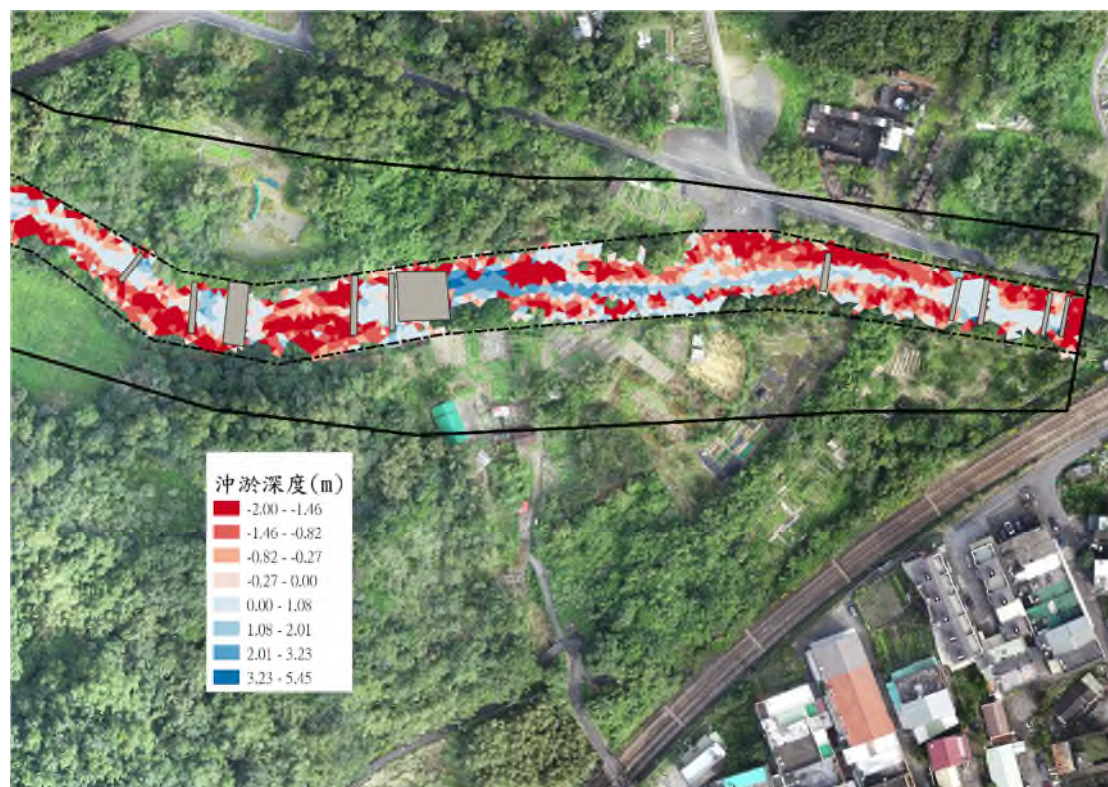


圖 4-68 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-15 號沖淤圖(1-6 號區段)

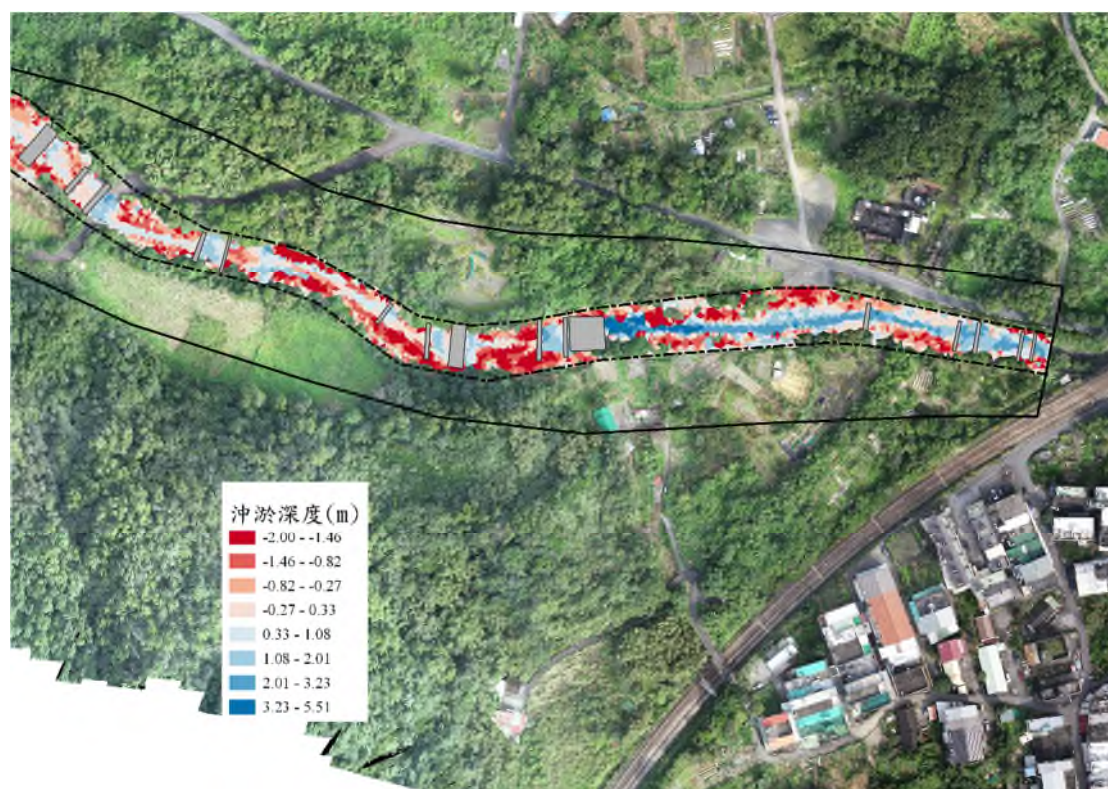


圖 4-69 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-23 號沖淤圖(1-6 區段)

由模擬結果圖可以看出因 50 年重現期距流量歷線尖峰流量可高達 263 cms，屬於極端降雨事件，且 1~6 號固床工區段之河流寬度較為細小，實地場勘也發現 5~6 號之間護岸並不高且在也有看到土坡，因此此處沖刷較嚴重，與 2 年重現期距相比橫向沖淤範圍擴大了許多，而同樣 50 年重現期距相比，可以看出圖 4-67 因模擬範圍小而導致的沖刷量比其餘大，大流量下相同現象比 2 年重現期距更為明顯，而圖 4-69 在大流量下坡度的影響則不像 2 年重現期距，23~15 號固床工間距區段所沖刷之泥沙在大流量下並無停留在 15~6 號間距區段跡象而是加劇刷深如下圖 4-70、圖 4-71：

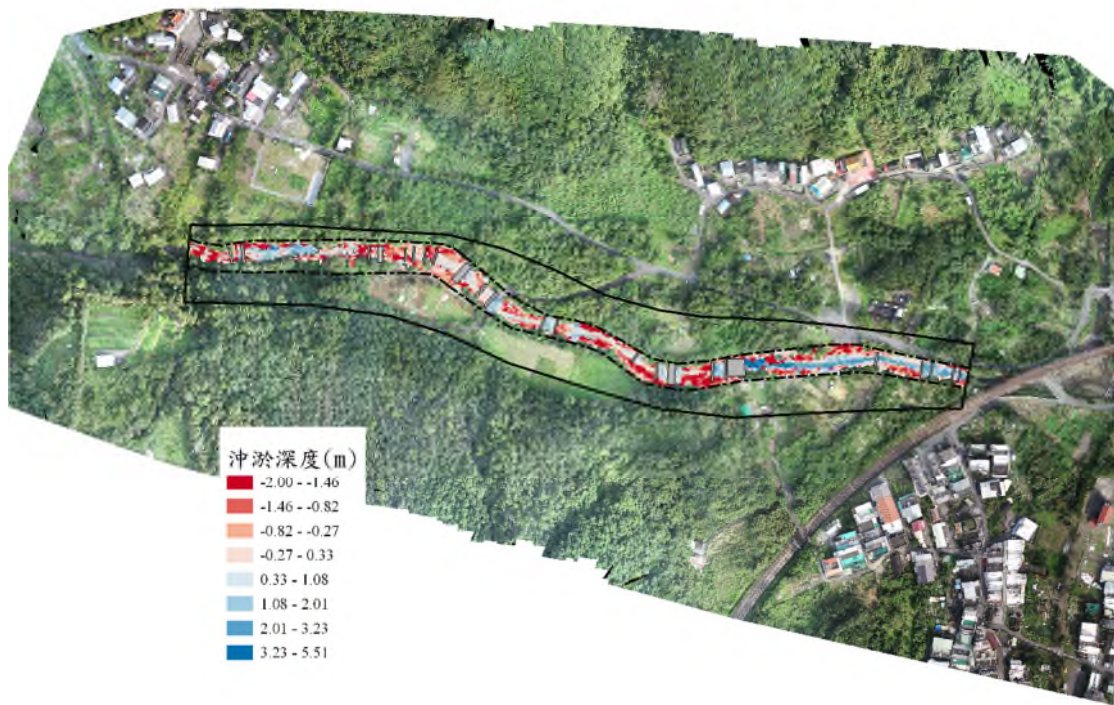


圖 4-70 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-23 號沖淤圖

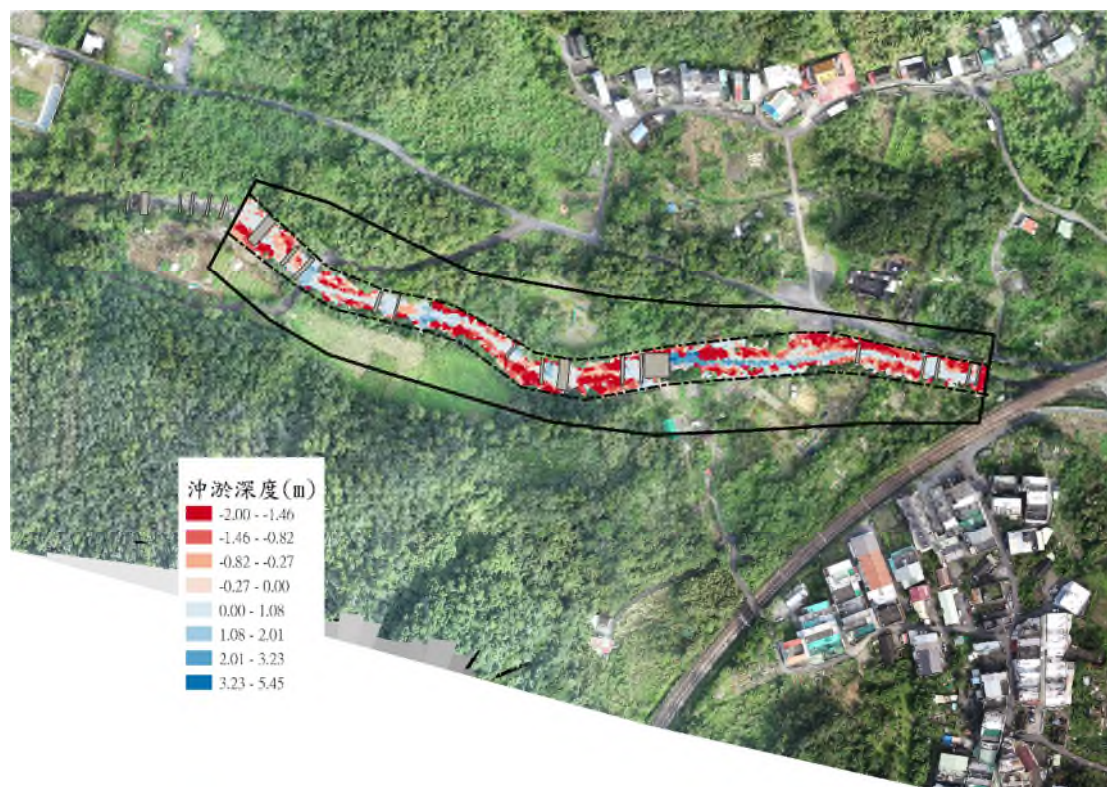


圖 4-71 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-15 號沖淤圖

由兩張模擬圖之 15~6 號間距區段可以發現，圖 4-71 中之沖刷部分較圖 4-70 來的大，而淤積部分也較圖 4-44 來的少，與 2 年重現期距之流量不同，大流量下之坡度因子的影響不大，所挾帶之泥砂並不會在 6~15 號固床工區段沉積，因此圖 4-70 淤積部分則會大於圖 4-71。

2. 沖淤模擬面積比

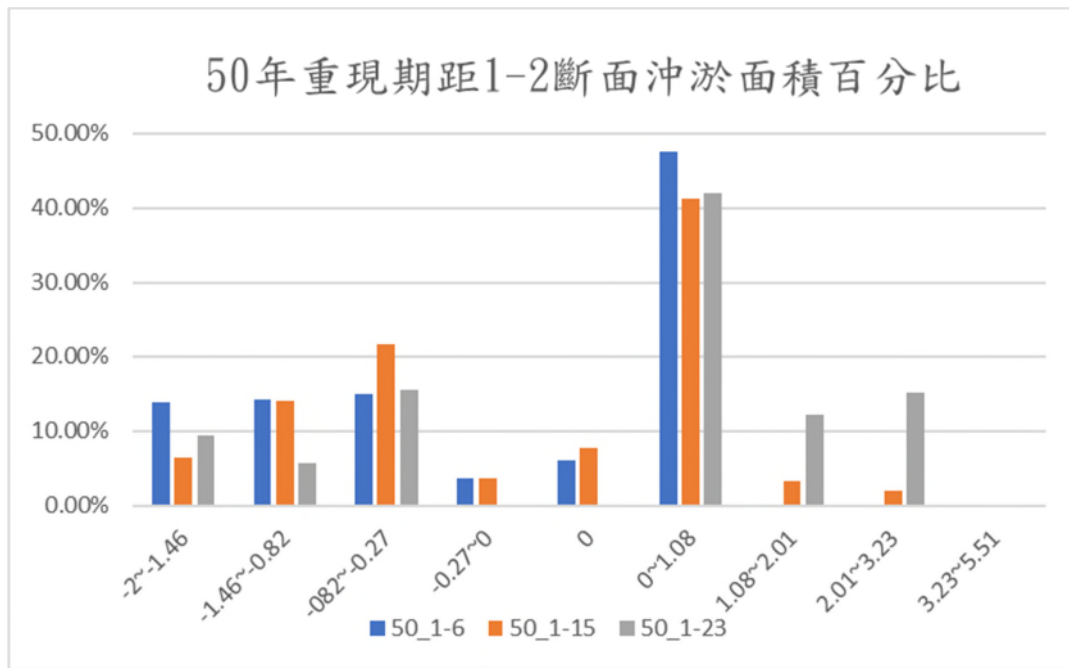


圖 4-72 梗枋南勢溪 50 年重現期距 1-2 斷面沖淤面積百分比

藍色條為 50 年重現期距 1-6 號固床工(1-2 斷面)沖淤分佈面積百分比，可以發現沖刷部分在大沖刷區間比例是比較高的，淤積部分相較於其它兩種範圍淤積量只在 0~1.08 區段，為深沖淺淤，在 50 年重現期距大流量下，以 1-6 號固床工小範圍較不能展現其淤積部分，但能清楚看出其局部沖刷趨勢；橘色條為 50 年重現期距 1-15 號固床工(1-2 斷面)沖淤分佈面積百分比，可以發現相較於 1-6 號，沖刷部分如同 2 年重現期距由大沖刷轉移至小沖刷，且沖刷跡象更為明顯，淤積部分則不同於 1-6 號固床工範圍，由小淤積量 0~1.08 轉至更大淤積量；灰色條為 50 年重現期距 1-23 號固床工(1-2 斷面)沖淤分佈面積百分比，可以發現沖刷部分如同 2 年重現其距，較 1-15 號更為均衡，淤積部分則不同於 2 年重現期距，並無由 0~1.08 小淤積量區段轉至大淤積量區段，而是與 2 年重現期距不同不因坡度影響來沙量大而增加了大淤積量區段。

在縱觀三個範圍之沖淤模擬圖與沖淤面積百分比後，可以看出 1-23、1-15 間距與 1-6 間距有其不同泥沙沖淤型態，設計時須注意不同間距沖淤情勢才能應對不同泥沙沖淤情況，如果以模擬結果來看 50 年重現期距極端流量下來看，1-6 間距因為上游並無固床工減緩流速，因此沖刷過大較不適合，而從結果可以發現在 50 年重現期距流量下 23~15 號坡度因子影響微乎其微，導致 1-23 號間距與 1-15 號間距模擬結果差距不大，但考慮 1-23 區間對於 1 號固床工上游淤積過大問題，以所設定之三種間距看來，在 50 年重現期距流量下 1-15 號固床工間距範圍是較適合梗枋南勢溪沖淤情況，但 50 年重現期距屬於極端降雨事件，且在設計固床工間距時仍須考量其餘因子，若以一個研究區域判定太過武斷，因此，本研究將持續進行另外兩樣區固床工間距泥沙沖淤數值模擬，最後分析比較三樣區並歸納整理出結論，提供為不同溪流設計固床工間距時參考依據。

另外而也能從 2 年重現期距與 50 年重現期距整體沖淤圖看出不同間距密度對於泥沙沖淤之關係如下圖 4-73：

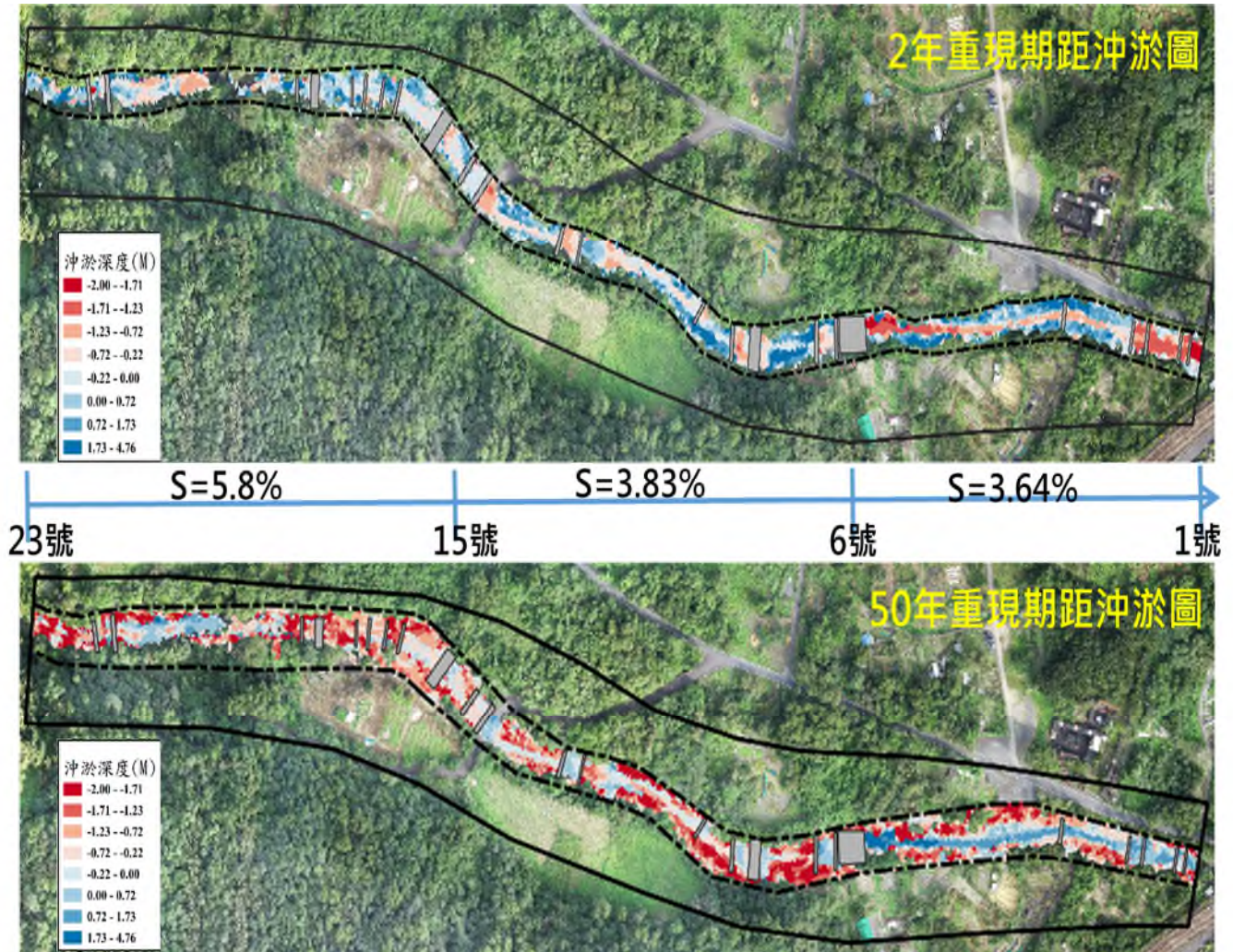


圖 4-73 梗枋南勢溪不同重現期距整體沖淤圖比較

若以固床工間距密度關係來看，在第一段 1-6 號區間中 1 號到 4 號固床工間距是較為密集的，而 4-6 號區間間距則擴大許多，由 2 年與 50 年模擬結果圖可以看出，若在間距密度較為密集之區域，泥沙沖淤情況會相較於間距擴大區段較趨於穩定，在相似坡度之 6-15 號區間範圍也可以看出這種情況，間距較密集之 6-10 號區段與 15-16 區段明顯比 10-15 區段在沖刷與淤積有更顯著地穩定河床效果，凸顯了建置固床工的效益，而這種效果隨著坡度的陡峭程度成了正比，15-23 號區間是三段坡度中最陡的，而較密集之 15-21 號區間與較分散之 21-23 號區間由模擬圖中可明顯看出其差異，隨著坡度提升，若減小固床

工間距能確實穩定其沖淤幅度。

因此以模擬現況來說，較密集之固床工間距能達到穩定河床效益且會與坡度的增長成正比，但如同先前所說，設計固床工間距時仍須考量眾多其於因子，目前先以一個示範研究樣區分析坡度因子與密集程度判斷，後續仍然會持續進行另外兩樣區(水仙溪與大溪析)固床工間距的泥沙沖淤數值模擬，最後依據三樣區不同考量因子彙整資料並歸納整理出結論，以做為未來水保局如需針對台灣多處不同情況溪流設計固床工間距時的參考依據。

二、水仙溪

為了取出不同間距，本研究參考文獻水仙溪下游治理工程圖說資料，將其工程範圍劃分為三個區間段，如下圖 4-74 所示，離上游邊界條件最近之第一號固床工至第四號固床工計算間距為 18.67m，第四號固床工至第十號固床工計算間距為 32.33m，第十號固床工至第十五支固床工計算間距為 24m，並以此分區進行模擬與研究。

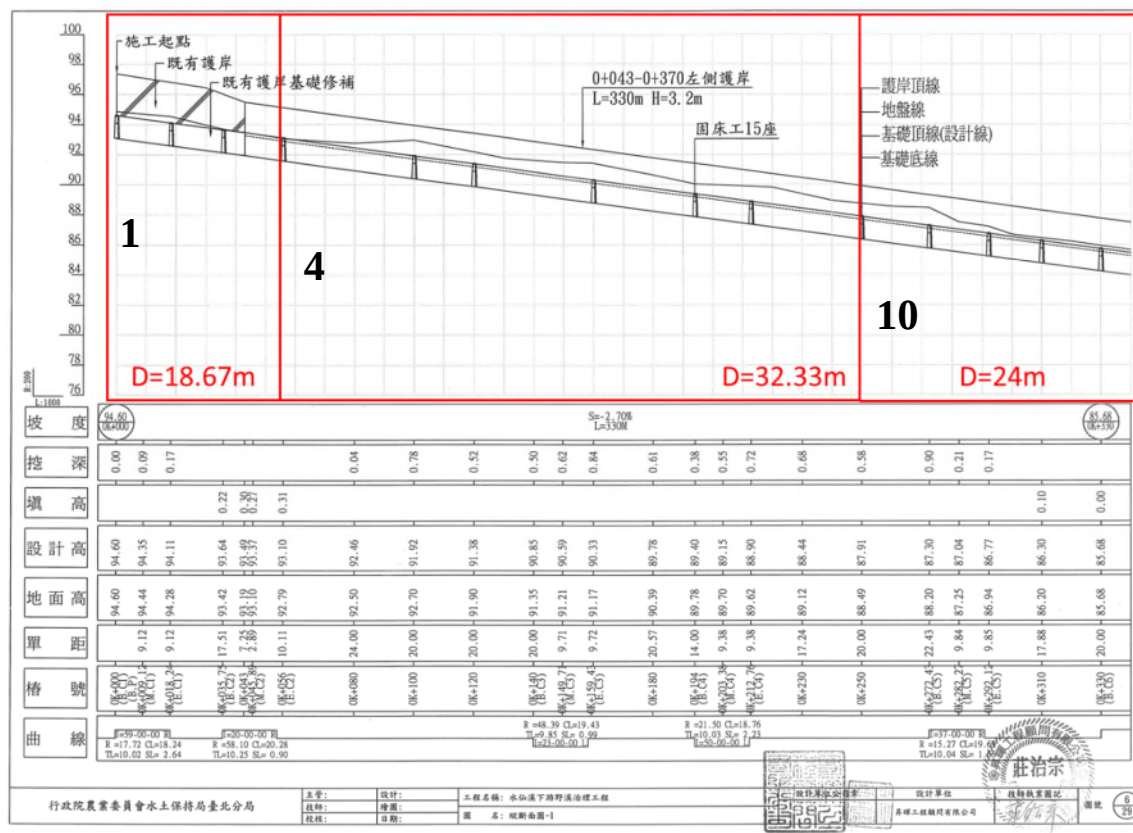


圖 4-74 水仙溪下游治理工程圖 1

為了比較沖淤間距範圍變化，本研究將沖淤深度範圍區間調至相同，而沖刷區段分別為-2~-1.40(m)、-1.40~-0.87(m)、-0.87~-0.43(m)、-0.43~0.00(m)，而淤積區端分別為 0.00~0.43(m)、0.43~0.87(m)、0.87~1.4(m)、1.4~1.67(m)。

2 年重現期距是為觀察日常暴雨後之河川沖淤情形，為得出三個不同區間固床工對其泥沙沖淤之影響，可以由圖 4-76 看出，在固床工間距較小的 1 號到 4 號固床工區間(18.67m 之區間)並無如無固床工區域沖刷嚴重之情形發生，可以顯示此固床工間距有效地發揮其減緩沖刷之功能，與一般固床工不同的是，水仙溪固床工為拱型固床工，由模擬結果圖可發現在 1 號到 4 號固床工區間淤積之現象多集中於固床工中心處，對河床兩側護岸達到一定的保護力，適當的編排拱型固床工方向及能在彎道處保護凹岸過度沖刷以及凸岸嚴重淤積情形；而在固床工間距較大的後面兩個區間 32.33m 以及 24m 可以發現沖刷之現象較為明顯，多為紅色沖刷區塊，由此可知，在此水仙溪系列固床工之作用下，適當之間距確實能有效地抑制河川沖刷，發揮其功能。

除間距部分，本研究更深入分析水仙溪之拱型固床工之編排與樣式，發現水仙溪之固床工多為上拱型固床工，由結果圖中亦可看出水流經過固床工時，河床中心多呈現紅色部分，其表示河床中心多沖刷現象，而河床兩側多呈現藍色部分，表示河床兩岸多淤積現象，明顯顯示出上拱型固床工之特性，能匯集水流，使水流往河床中心流動，避免兩岸沖刷之功能。

(二)50 年重現期距不同間距範圍比較

1. 沖淤模擬圖

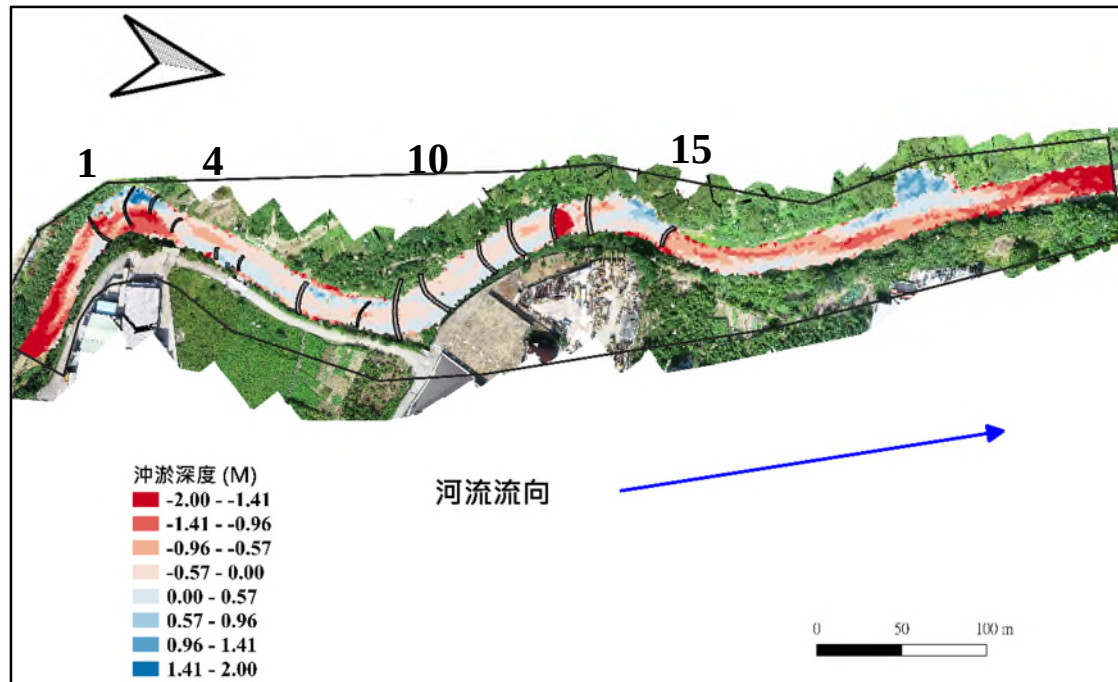


圖 4-77 水仙溪下 50 年重現期距之沖淤圖

為了比較三種間距範圍變化，50 年重現期距亦將沖淤深度範圍區間調至相同，而沖刷區段分別為 $-2\sim-1.41(\text{m})$ 、 $-1.41\sim-0.96(\text{m})$ 、 $-0.96\sim-0.57(\text{m})$ 、 $-0.57\sim 0.00(\text{m})$ ，而淤積區端分別為 $0.00\sim 0.57(\text{m})$ 、 $0.57\sim 0.96(\text{m})$ 、 $0.96\sim 1.41(\text{m})$ 、 $1.41\sim 2.00(\text{m})$ 。

由水仙溪 50 年重現期距沖淤圖可以看出其河川上下游區段之沖刷現象較 2 年重現期距來的深，可顯示其沖刷現象較嚴重，而此水仙溪系列固床工區段能確實有效地發揮其功能，抑制沖刷。

如同 2 年重現期距所看到的，在固床工間距較小的上游段，固床工中間多呈現些微淤積，無沖刷現象之產生，而往下游固床工間距較大之區段，可看出較上游端沖刷較明顯之現象，圖中呈現沖刷之紅色部分較多，由此可知，在系列固床工之作用下，適當之間距確實亦能有效地抑制 50 年重現期距之河川沖刷，發揮其功能。

最後由 50 年重現期距極端流量下可看出，水仙溪在本研究區域段其中連續彎道處依照其彎度設計不同形式及間距固床工確實能降

低過度冲刷及淤積現象，且拱型固床工在極端流量下能保持水流集中於河流中心並無造成溢流情形。

三、大溪溪

本研究參考文獻大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖說資料，其工程範圍中固床工間距皆相等，皆相距 50m，於河床上之坡度也多相同，如下圖 4-78 所示。

因此，此處將此工程範圍視為同一區間進行模擬，並採用其間距與其他兩樣區進行比較與分析。

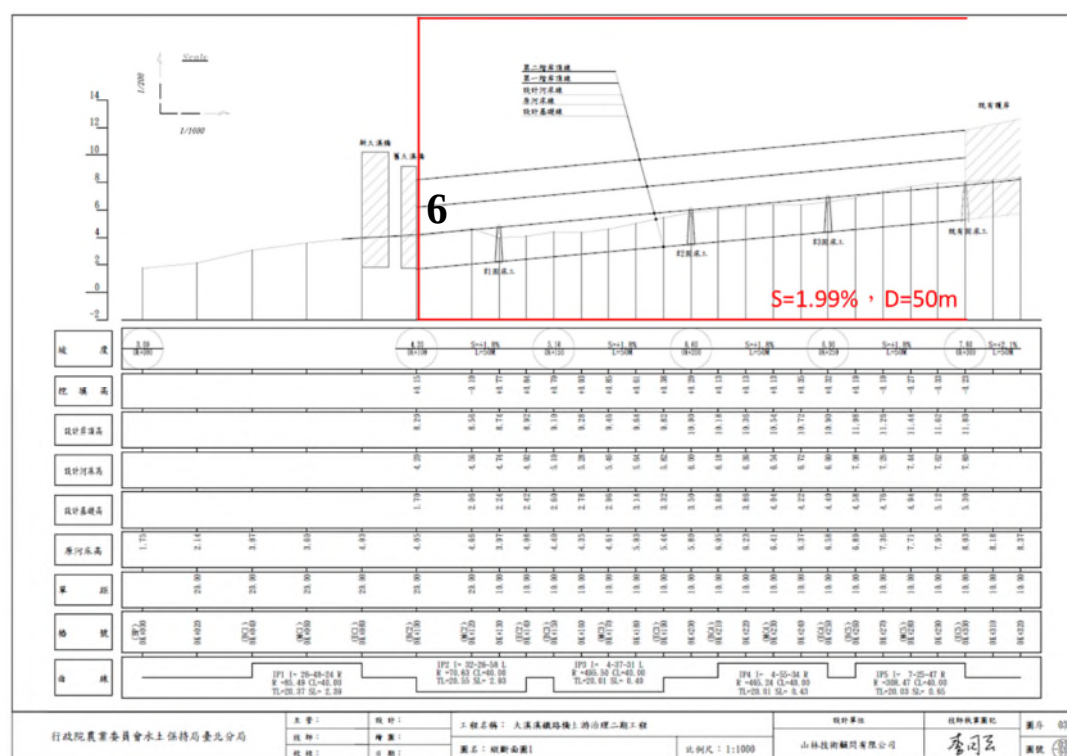


圖 4-78 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 1

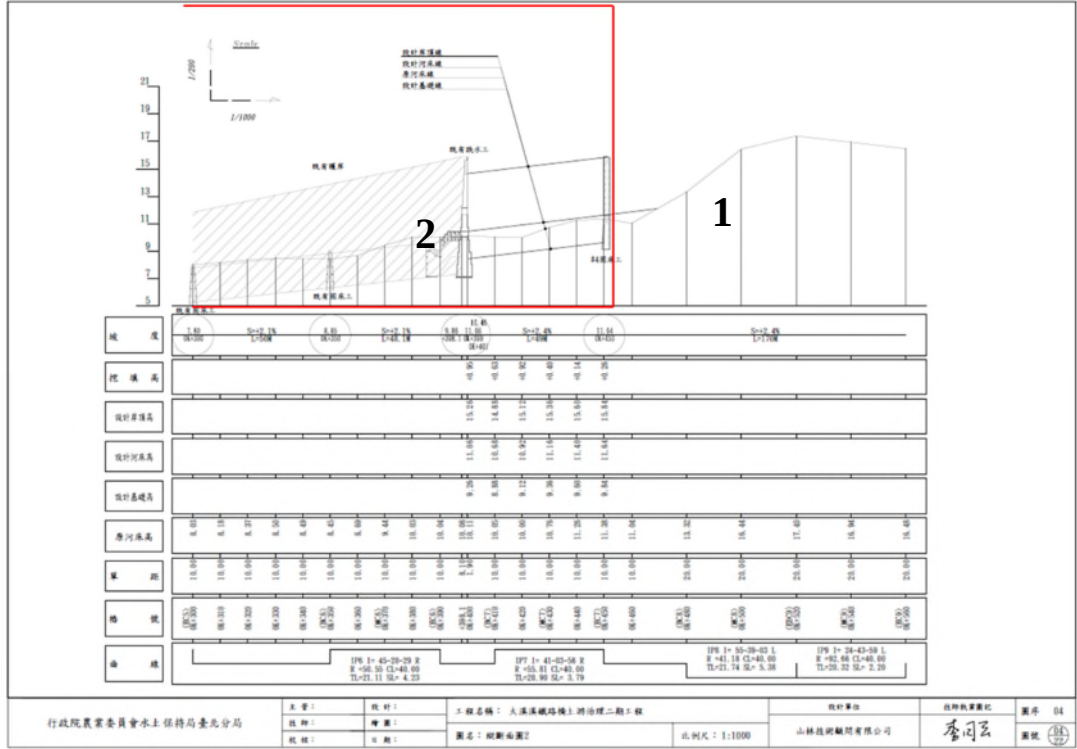


圖 4-79 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 2

(一)2 年重現期距不同間距範圍比較

1. 沖淤模擬圖

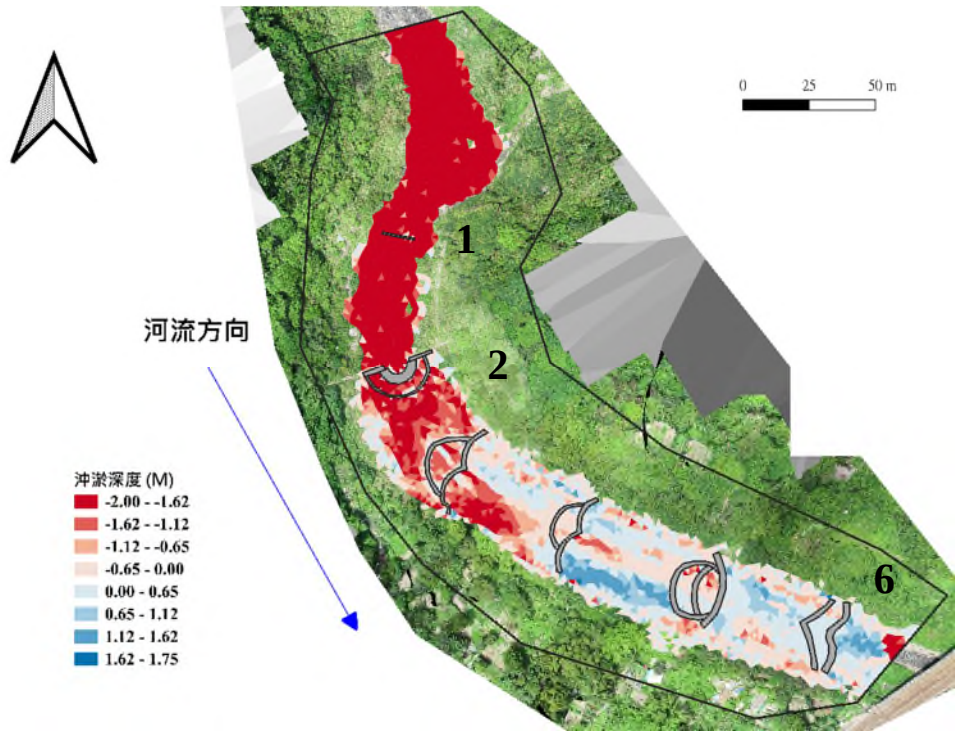


圖 4-80 大溪溪下 2 年重現期距之沖淤圖

為了比較沖淤範圍變化，本研究將沖淤深度範圍區間調至如下，
沖刷區段分別為-2~-1.62(m)、-1.62~-1.12 (m)、-1.12~-0.65(m)、-
0.65~0.00(m)，而淤積區端分別為 0.00~0.65(m)、0.65~1.12(m)、
1.12~1.62(m)、1.62~1.75(m)。

大溪溪因過去坡腳沖刷邊坡嚴重，危害了下游出海口處鐵路橋與台 2 線安全，因此設計了多元型固床工包含圓弧形階梯跌水工、雙弧形固床工等等，本研究 2 年重現期距是為觀察日常暴雨後之河川沖淤情形，由模擬結果圖可看出研究區域段上游入流口部分沖刷較嚴重，原因有其二，其中一點是因為上游入流口部分多處無固床工設計，且長距離範圍內只有一支小小傳統直線型固床工，而下游較接近鐵橋與道路之 2-6 號處固床工部分為新設計之多元型固床工，也是本研究範圍所要探討之河段；而第二點原因是因為研究區域段上游入流口部分坡度陡峭如下圖 4-81，與下游 2-6 固床工部分之 1.99%相差甚大，因此沖刷多聚集於此處。

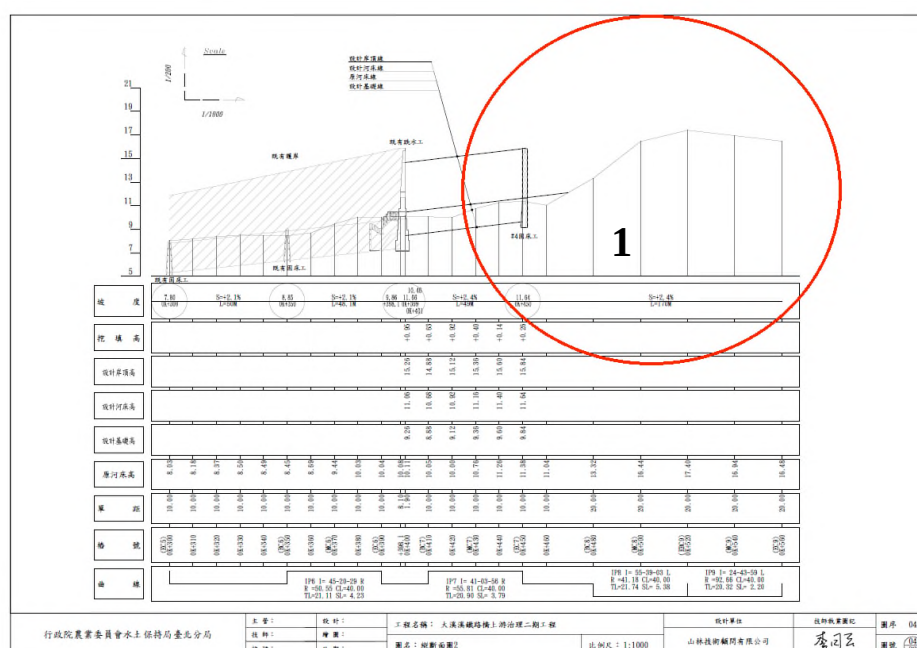


圖 4-81 大溪溪鐵路橋上游治理二期工程圖 3

本研究區段 2 號固床工至 6 號固床工由模擬結果圖顯示，在此坡度間距下能有效減緩其沖刷範圍由 1 號固床工下刷，而淤積部分也經由多元設計並無固定於河床左岸或右岸，減緩河流之向凹岸沖刷、凸岸淤積之自然機制。

(二)50 年重現期距不同間距範圍比較

1. 沖淤模擬圖

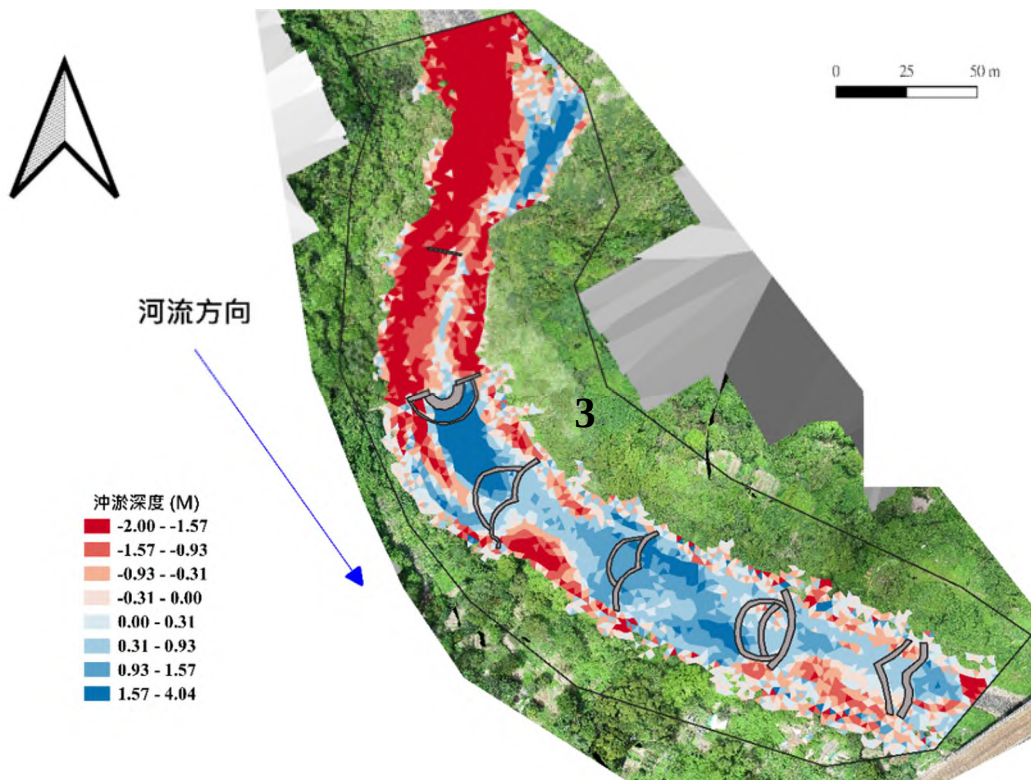


圖 4-82 大溪溪下 50 年重現期距之沖淤圖

為了比較三種間距範圍變化，50 年重現期距亦將沖淤深度範圍區間調至如下，沖刷區段分別為-2~-1.57(m)、-1.57~-0.93(m)、-0.93~-0.31(m)、-0.31~0.00(m)，而淤積區端分別為 0.00~0.31(m)、0.31~0.93(m)、0.93~1.57(m)、1.57~4.04(m)。

相比於 2 年重現期距日常暴雨流量，50 年重現期距之極端流量

下大溪溪水位高度高，再加上模擬範圍距離比其餘兩條溪略短，導致水深在本研究大溪溪模擬範圍較高，因此大流量下反而對於溪流底床沖刷量下降(圖中紅色部分)，反而同樣因多元固床工設計，將流速減緩泥沙沉降，造成了途中藍色部分淤積範圍較多，另外可以發現多元型固床工能將極端流量下挾夾帶之泥沙控制在第3號固床工之上游。

最後由50年重現期距極端流量下可看出，大溪溪在本研究區域段其多元設計固床工形式及其間距確實能降低過度沖刷及減緩大量泥沙往下挾帶至鐵橋與道路淤積，且多元型固床工在極端流量下能保持溪流暢通，並無往外溢淹之安全疑慮。

四、結論

在模擬分析完三條溪各自工程段系列固床工的泥沙沖淤型態後，本段將彙整三條溪兩種重現期距模擬成果如下圖 4- 83、圖 4-84、圖 4-85 與其分析資料，針對系列固床工之三種沖淤因子分別為：間距、坡度、型式，進行整合並整理出最後結論供未來設計及實務施工參考。

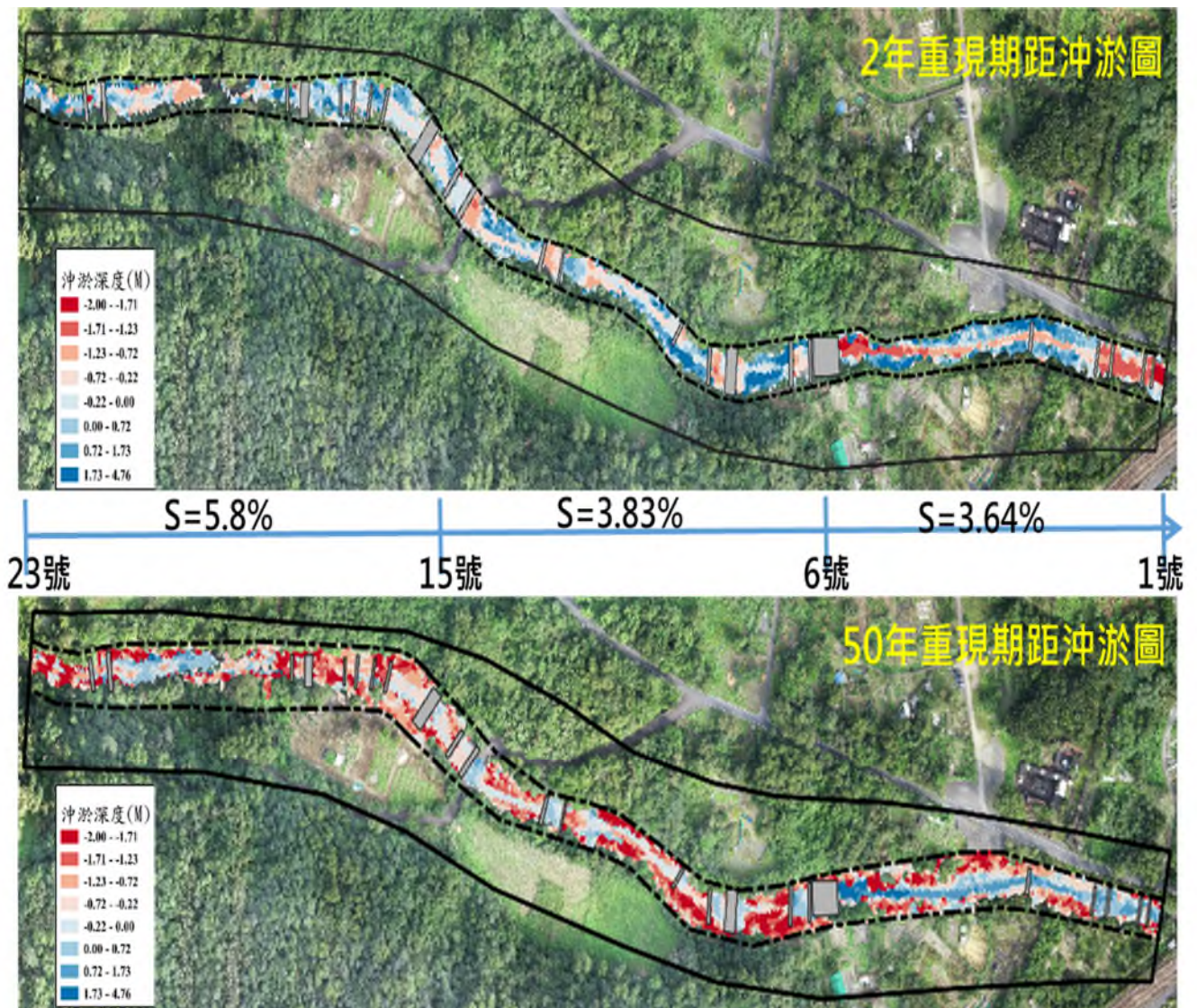


圖 4- 83 梗枋南勢溪不同重現期距整體沖淤圖比較

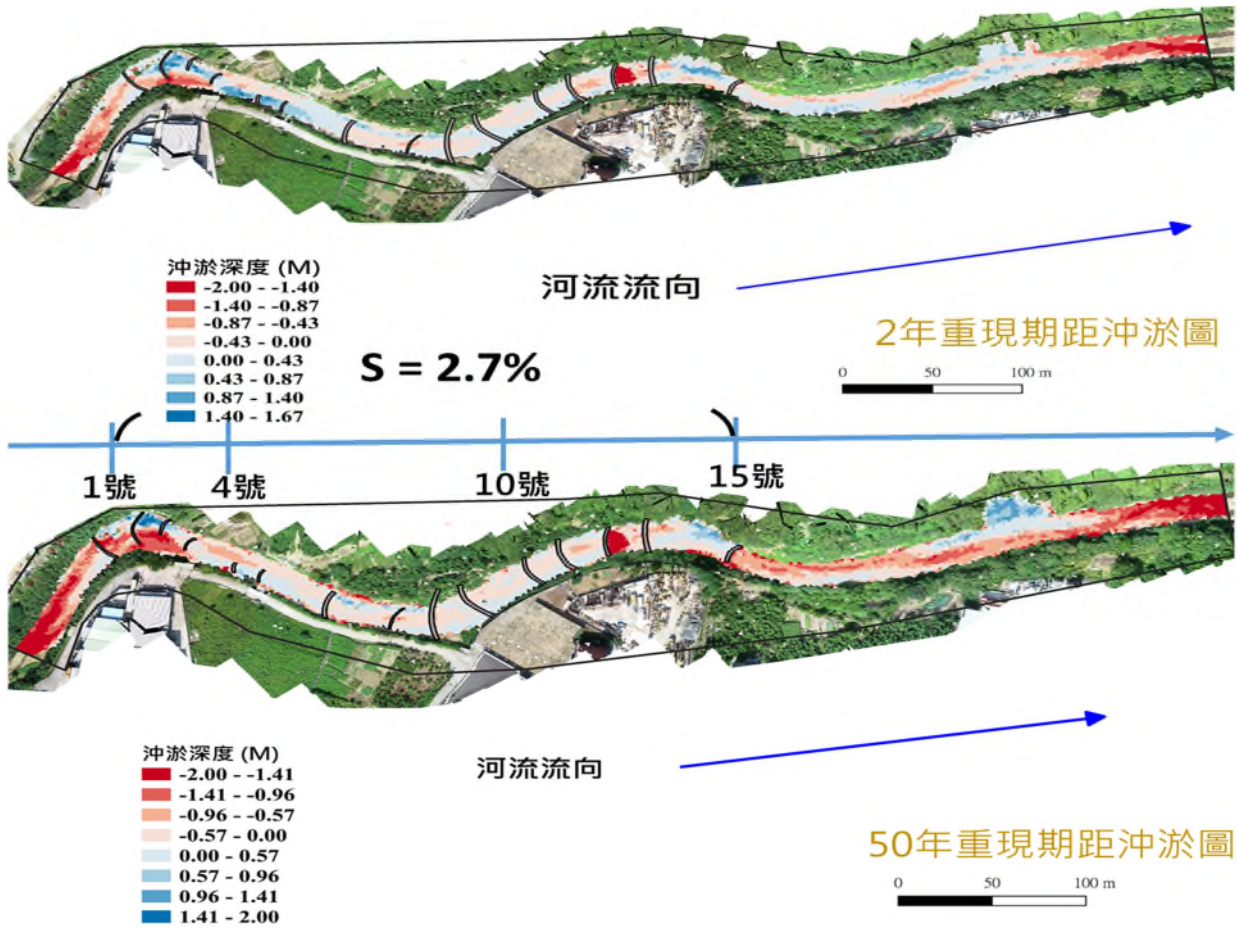


圖 4-84 水仙溪不同重現期距整體沖淤圖比較

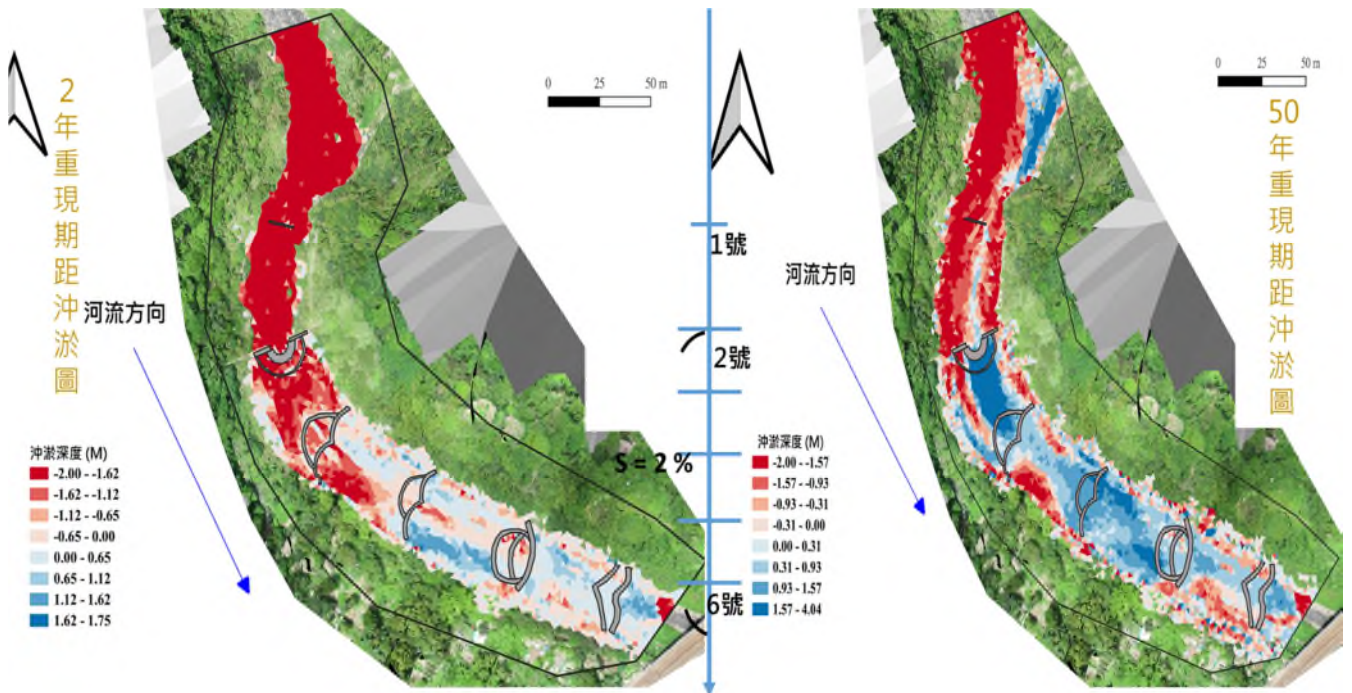


圖 4-85 大溪溪不同重現期距整體沖淤圖比較

(一) 間距

梗枋南勢溪在三條溪之中系列固床工數量是最多的，也是系列固床工工程段距離最長的，因此本研究將其分為三段，由模擬結果圖 4-83 可看出在固床工間距較密集之 1-6 號區間中 1 號到 4 號固床工間距是最為密集的，而 4-6 號區間間距則擴大許多，由 2 年與 50 年模擬結果圖可以看出，若在間距密度較為密集之區域，泥沙沖淤情況會相較於間距擴大區段較趨於穩定，在相似坡度之 6-15 號區間範圍也可以看出這種情況，間距較密集之 6-10 號區段與 15-16 區段明顯比 10-15 區段在沖刷與淤積有更顯著地穩定河床效果，凸顯了建置固床工的效益；此種情況也能從水仙溪模擬結果圖圖 4-84 看出，在水仙溪 1-4 號固床工區間固床工設置較 4-10 號固床工區間密集，由 2 年重現期距模擬結果圖可看出，較密集之 1-4 區間減緩了上游大量泥沙沖刷影響，但避免河床過度淤積因此在後續 4-10 採用了間距較為擴大之固床工區間維持期沖淤平衡；最後由大溪溪圖 4-85 短模擬範圍明顯凸顯出 1 號固床工與 2-6 區間密集固床工之差異，由 2 年重現期距日常暴雨量模擬圖看出能阻止上游大量泥沙往下沖刷，也能由 50 年重現期距極端暴雨量模擬圖看出其密集間距能阻止上游泥沙往下挾帶，將其流速迅速下降並沉降至此區至鐵路與道路。

綜觀三條現地溪流不同重現其距沖淤模擬狀況，可以發現在設計及建置系列固床工時，間距是對於溪流首要考慮的因子，必須配合溪床不同河段沖淤情形安排適合其河段之適當間距，一來可以防止泥砂過度沖刷，也能調整間距使河床達到沖淤平衡狀態，但除了間距影響下，還有另一個因子也是息息相關，就是不同河川的河床坡度不同，在設計及建置時必須要將此因子考慮進去，坡度部分將於下小段說明。

(二) 坡度

設計固床工間距時仍須考量眾多其於因子，間距在坡度因子的影響下就是值得探討的一點，在梗枋南勢溪模擬圖圖 4-83 中，可以看出梗枋南勢溪河床坡度陡峭程度對於其間距沖刷程度有一定相關性，15-23 號區間是三段坡度中最陡的，而較密集之 15-21 號區間與較分散之 21-23 號區間由模擬圖中可明顯看出其差異，隨著坡度提升，若減小固床工間距能確實穩定其沖淤幅度，因此以梗枋南勢溪模擬現況來說，較密集之固床工間距能達到穩定河床效益且會與坡度的增長成正比；而水仙溪固床工工程區間之坡度為 2.7%比梗枋南勢溪三段工程區間坡度皆較緩，大溪溪固床工工程區間坡度為 2%，又比水仙溪更緩一些，因此本研究將梗枋南勢溪最緩之 1-6 固床工區間與水仙溪、大溪溪進行比較分析。

在同樣間距下，不一樣的溪床坡度會導致不同之泥砂沖淤情形，不同間距下，相同坡度也同樣會產生不一樣之泥砂沖刷情形，由梗枋南勢溪結果圖可得知，在不同坡度下，間距密集程度與陡峭程度成正比，而在梗枋南勢溪與水仙溪、大溪溪模擬結果圖中，也可以看出在相同坡度下若間距縮小，如梗枋南勢溪 1-6 區間 1 號到 4 號固床工、水仙溪 1-4 號固床工區間、大溪溪 2-6 固床工區間，其對於穩定河床能力將會上升，使整體工程區段更趨於穩定，而最後將要探討的是固床工的型式對於泥砂沖淤之影響，將於下小段進行說明。

(三) 型式

在不同型式固床工下泥沙沖淤在河床上的結果將會有所不同，本研究此次挑選了三條溪做為比較分析，三條溪內工程段之固床工設計皆為不同型式，其中第一是梗枋南勢溪的傳統直線型固床工，第二是

水仙溪的拱型固床工，第三則是大溪溪的複合型多元固床工，傳統直線型固床工遇到較為蜿蜒之河道較無法靈活配合河床及控制水流方向，而拱型固床工有上拱型及下拱型可配合河道彎道方向進行調整，且上、下拱型固床工能有分散、束縮水流等特性，能改善原河段河床沖淤過度或是護岸基礎之掏空，而大溪溪之複合型多元固床工包含了魚鱗、魚尾型固床工及圓弧階梯形跌水工，可降低高低落差維持生物縱向通路，且相較於直線型固床工能增加水瀑提高溶氧量，是能兼顧防災與生態的新型固床工組合。

由梗枋南勢溪模擬圖圖 4- 83 可看出在 15-6 區間 11 號及 8 號固床工下游兩段彎道處，傳統型固床工會面臨護岸沖刷過大問題，而由水仙溪模擬圖圖 4-84 可發現在水仙溪工程段彎道處 2、3 號及 9、10 號的上拱型固床工調整其方向，有效將水流束縮於河床中心，避免了對於護岸基礎之掏刷，而大溪溪複合型多元固床工之效用，可由大溪溪模擬圖圖 4-85 清楚看出，其 4、5 號固床工下游淤積部分分別個別分散於左右岸，除了避免過度掏刷、淤積於某一岸抵抗河流側蝕機制，同時也能減緩流速且能保持溪流暢通。

泥砂沖淤運動在興建固床工後是一門精深的學問，特別是遇上不同型式固床工更為難預測其河床反應，因此本研究將三條溪不同型式之固床工進行模擬分析比較歸納資料與結論，期望未來能提供不同溪流設計固床工間距時參考依據。

第五章 工作進度與組織

一、工作進度

預定工作項目為固床工之文獻與現地工程資料蒐集、數值模擬輸砂性質、資料彙整與結論、製作圖說及設計準則等 4 大項。工作進度如表 5-1。

(一)固床工水理機制相關文獻與資料收集

本團隊目前已蒐集了國內外有關固床工的文獻資料，其中包括國內外不同型式、間距系列固床工之水流特性、沖刷類型、影響因子、深度評估、設計參數及分析模式等資料，以瞭解其設計應用時所需考慮的水理機制、設計因子估算方法以及模式分析方法，並針對其設計可能遇到的問題進行分析。

(二)現地資料蒐集

本團隊目前已蒐集三樣區基本資料包含集水區水文資料、地理位置、地形資訊等等，並將三樣區中示範樣區梗枋南勢溪之集水區水文分一一詳細列出過程，將會以相同分析方法、步驟於期末完成另外兩樣區水文分析，且為避免重複呈現冗長計算過程，會以最終結果型式表示。

(三)數值模擬輸砂性質

本團隊目前以完成 RiverFlow 2D 模式介紹包含模式模擬中重要的理論方程式與輸砂模組介紹，另外也完成示範樣區梗枋南勢溪之模式所需模型建構與各模擬參數設定，同時也將針對梗枋南勢溪做模擬敏感度分析、輸砂公式分析、不同間距範圍分析等等。

(四) 資料彙整與結論

本團隊將模擬成果資料彙整後，歸納出示範樣區因子與間距關係之結論，將會把初步成果與後續進行之兩樣區進行分析比較，歸納統整出結論提供為不同溪流設計固床工間距時參考依據。

表 5-1 預定工作進度表

時間 工作項目	110 年 2 月	110 年 3~4 月	110 年 5~6 月	110 年 7~8 月	110 年 9~10 月	110 年 11~12 月
1.固床工文獻				期中		
2.現地工程資料蒐集		期初				
3.數值模擬輸砂性質						期末
4.資料彙整與結論						
工作進度估計 百分比(累積數)	10	25	45	65	85	100

二、工作組織

為有效且確實執行本計畫，國立臺灣大學將針對本計畫工作項目，動員生工系黃宏斌教授與其研究助理組成主要工作團隊，並指派計畫主持人黃宏斌教授，代表國立臺灣大學，負責執行本服務工作，且與主辦單位保持密切之聯繫。依據本服務計畫書之工作構想，並參酌辦理其他相關計畫服務工作之經驗，參與本服務工作之人員按工作性質分為：等三組。各參與主要工作人員之學經歷與工作項目詳見表 5-2 與表 5-3。

表 5-2 各組工作人員之主要工作項目表

組別		工作人員	主要工作項目
計畫主持人		黃宏斌	督導計畫各項工作推行及進度掌控 計畫方向擬定及會議召集、協調
一、蒐集國內外不同型式、間距系列固床工相關文獻	組長	李偉哲	協助分配各組員蒐集不同部分、方向之文獻並進行統整
	組員	劉彥廷	協助蒐集固床工水理特性文獻
	組員	許閔婷	協助蒐集沖刷回歸因子文獻
	組員	涂晉祥	協助蒐集數值模擬分析文獻
二、現地資料蒐集	組長	李偉哲	協助規劃各組員進行不同主題撰寫並統籌
	組員	劉彥廷	協助蒐集過去現地文獻資料
	組員	許閔婷	協助進行集水區水文分析
	組員	涂晉祥	協助進行地形資料與建置
三、二維輸砂數值模擬	負責人	黃宏斌	依據模擬內容成果進行分析
	組長	李偉哲	協助模擬成果彙整
	組員	劉彥廷	協助撰寫模式介紹與參數設定
	組員	許閔婷	協助進行敏感度分析與輸砂公式分析
	組員	涂晉祥	協助不同模擬範圍分析

計畫主持人黃宏斌教授在水土保持水理分析與滯洪、沉砂設施之工作經驗方面具有多年經驗，土砂處理對策上具備許多實務與行政經

驗，計畫主持人受水土保持局委託辦理過之計畫如下所示。

本團隊工作人員均具豐富之學經歷背景，可順利圓滿完成本計畫工作，主持人也將透過不定期之會議，督導掌握研究團隊執行之期程。深信在研究團隊專業研究能力及實務經驗下，能順利完成本計畫預定工作內容及目標。

表 5-3 本計畫主要工作人員之背景與專長一覽表

類 別	姓 名	職 稱	最 高 學 歷 科 系	專 長
主持人	黃宏斌	國立臺灣大學 教授 水工試驗所 特約研究員	愛荷華大 學土木及 環境工程 學系博士	工程生態檢核 土砂災害防治規劃 水利防災 水理分析 輸砂水力學
工作人員	李偉哲	專任研究助理	國立臺灣 大學 生物環境 系統工程 學系碩士	水土保持工程規劃 設計、水工構造物規 劃設計、輸砂分析、 水理分析
工作人員	劉彥廷	兼任研究助理	國立臺灣 大學 生物環境 系統工程 學系碩士	水土保持工程規劃 設計、水工構造物 規劃設計、輸砂分 析、水理分析
工作人員	許閔婷	專任研究助理	國立臺灣	地質調查評估、水

類 別	姓 名	職 稱	最 高 學 歷 科 系	專 長
			大學 生物環境 系統工程 學系碩士	資源開發評估及設計、水利構造物調查評析
工作人員	涂晉祥	兼任研究助理	國立臺灣 大學 生物環境 系統工程 學系碩士	模式操作設計 現地調查

參考文獻

研究報告與論文

1. 黃政達，碩士論文，“由動床試驗探討固床工之間距”，中興大學水土保持學系，1995
2. 游繁結，“固床工間距之調查研究（三）”，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號，1995
3. 吳嘉俊，2001，固床工間連續帶工間距之研究，行政院農委會水土保持局研究報告
4. 王傳益，薄榮鋼，張耿偉，李昱廷，2004，固床工於河川棲地改善之數值研究，水土保持學報 36(1)
5. 張程凱，2016，明渠流通過固床工下游粗糙底床沖刷坑之紊流場數值分析，中興大學土木工程學系所學位論文
6. 何國勇，碩士論文，“近直線弧型開口式固床工應用於野溪治理之研究”，國立屏東科技大學水土保持學系，2007
7. 郭昌樺，碩士論文，“固床工間距對河床穩定性影響之研究”，國立中興大學水土保持學系，2002
8. 吳尚訓，碩士論文，“固床工間距對河床穩定性影響之研究”，逢甲大學土木及水利工程學系，2000
9. 吳嘉俊，“透水式固床工之工法研發與水理特性研究”，行政院農業委員會水土保持局，2016
10. 連惠邦，“固床工過流之水理探討”，教育訓練講義，2018
11. 黃宏斌，“105 年水土保持防砂構造物沖刷坑形成機制與防治

- 方法之探討”，行政院農業委員會水土保持局，2016
12. 李豐佐，“應用 UAV 影像分析技術於固床工變動及周圍流場之研究”，2017
 13. 詹勳全，“固床工下游之沖刷型態”，教育訓練講義，2018
 14. 聶志成，2007，應用 Fluent 於土石流對防砂壩衝擊力之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文
 15. 郭正壹，2008，河溪固床工配置生態化之研究，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士論文
 16. 吳健賓，2013，丁壩區之三維流場研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文
 17. 楊廣培，2015，卵礫河床載衝擊破壞河道固床工之模擬分析，國立交通大學土木工程學系碩士論文
 18. 水仙溪下游野溪治理工程圖檔，2015，行政院農業委員會水土保持局臺北分局
 19. 行政院農業委員會水土保持局，2017，水土保持工程設計參考圖冊
 20. 行政院農業委員會水土保持局，2017，修訂版水土保持手冊
 21. 何皓愷，2017，垂直跌水之沖刷探討，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文
 22. 黃宏斌，2018，107 年流域綜合治理之成效評析之工作執行計畫書，行政院農業委員會水土保持局
 23. 黃宏斌，2018，野溪固床工水理機制試驗分析計畫之工作執行計畫書，行政院農業委員會水土保持局

24. 黃宏斌，2019，拱型固床工之力學性質探討計畫，行政院農業委員會水土保持局
25. 黃宏斌，2020，拱型固床工之沖淤探討，行政院農業委員會水土保持局
26. 經濟部水資源局，2001 “水文設計應用手冊”
27. 周文德，1959，“明渠水力學”
28. 道上正規、鈴木幸一，1982 “床固め上下流域の全体的河床低下特性に関する研究” Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 323, 91-98.
29. 張則安、游繁結 1994 “固床工間距之研究” 國立中興大學碩士論文. 台中市.
30. 林榮紹、連惠邦 2001 “固床工減緩河床泥砂沖刷之試驗研究” 逢甲大學碩士論文. 臺中市.
31. 邱彥瑜、廖仲達、游景雲、石棟鑫、葉克家(2016)，「拆壩對河道影響評估—以大甲溪石岡壩為例」，災害防救科技與管理學刊，第5卷，第2期，第79-97頁。
32. 李文獻(2012)，「二維水理輸砂模式於壩體移除分析應用之探討」，國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
33. 周文杰、莊明德、李德旺、吳振欣(2011)，「防砂壩河川棲地改善之模擬研究—以北勢溪粗窟1號防砂壩為例」，水保技術期刊，第6卷，第4期，第142-151頁。
34. 詹勳全等(2017)，「應用二維水理輸砂模式評估野溪清疏成效之研究」，中華水土保持學報，第48卷，第3期，第113-126

頁。

35. 胡通哲等(2017),「十文溪橫向構造物改善規劃研究」,農業工程學報,第63卷,第2期,第78-93頁。
36. Zanke, U. “Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport” *Mitteilungen des Franzius Instituts der TU Hannover, Heft*, 47-48, 1978.
37. Matteo Tregnaghi, A. M., Andrea Bottacin-Busolin, Simon J. Tait1. “Modelling time varying scouring at bed sills” *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1761-1769, 2011.
38. Aberibigbe, J. and O. Rajaratnam. “Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets”, *Journal of Hydraulic Engineering*.124(10), 1998.
39. Dietz, J.W. “Ausbildung von langen Pfeilern bei Schräganströmung am Beispiel der BAB-Mainbrücke Eddersheim, ”*Mitteilungsblatt der BAW*,(31), 1972.
40. D’Agostino, V. “Indagine sullo scavo a valle di opera trasversali mediante modello fisico a fondo mobile.” *Energ. Elettr.*, 71(2), 1994.
41. Dell’Agnese, A., Mazzorana, B., Comiti, F., VonMaravic, P., & D’Agostino, V. (2013). Assessing the physical vulnerability of check dams through an empirical damage index. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(1), 9–16.
<https://doi.org/10.4081/jae.2013.e2>
42. Gaudio, R., Marion, A., and Bovolin, V, 2000. Morphological effects

- of bed sills in degrading rivers. Journal of Hydraulic Research, 38 (2),89–96.
43. Moslem Sohrabi, Alireza Keshavarzi, and Mahmood Javan, 2019. Impact of bed sill shapes on scour protection in river bed and banks. International Journal of River Basin Management, 17(3), 277-287
44. Roland Faeh, 2007. Numerical Modeling of Breach Erosion of River Embankments. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, Issue 9
45. HydroniaLLC. ,RIVERFLO-2D REFERENCE MANUAL, 2009
46. Singh, H. V. and Thompson, A. M.,(2016), Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds, Geoderma 262:165–173
47. Bennett, S.J., Alonso, C.V., Prasad, S.N., and Römken, M.J.M. Experiments on headcut growth migration in concentrated flows typical of upland, 2000
48. areas. Water Resour. Res, 36(7), 1911-1922.

網路資源

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所-規劃工具與知識，
<https://www.wrap.gov.tw/pro72.aspx?type=0207000000>
2. 行政院農委會水土保持局-水保榮耀，
<https://www.swcb.gov.tw/form/index-1.asp?m=3&m1=3&m2=694&gp=688&id=3419>

附錄一、期初審查意見與回覆

期初審查意見回覆			
編號	委員意見	意見回覆	頁數
1.	計畫預計執行空拍任務及建模的研究區域為?為何選擇該研究區域?	感謝委員意見，本團隊選擇以宜蘭縣頭城鎮梗枋南勢溪作為研究區域，主要是該河段有 23 座系列固床工，可視為理想之研究對象。	P.28
2.	數值分析模擬將進行幾組，考慮哪幾個影響因子如溪床坡度、固床工間距、固床工高差、整治前後之坡度減緩等。	感謝委員意見，溪床坡度、固床工間距、固床工高差、整治前後之坡度減緩等影響因子都是數值模擬需要深入探討的。流量設定除了設計洪峰流量外，也會探討枯水期的流量影響。因此，至少將進行 24 組討論。	詳見第四章
3.	數值分析結果預計如何驗證?	感謝委員意見，數值模擬沒有經過現場驗證是備受爭議的，本研究希望進行一個段落後，能夠爭取到另一個研究計畫從事現場驗證，再回饋修正數值模擬的相關參數，讓數值模擬應用的效益更廣大。	
4.	建議考慮現地條件差異，歸納基本設計流程及原則，期後續可研擬固床工設計原則，以供實務上應用參考。	感謝委員意見，經過現場驗證以及參數修正後，本研究成果未來可以做為固床工規劃設計的參考。	
5.	本計畫 109 年度獲補助”拱型固床工之沖淤研究”，請再詳予檢討研究成果，如何運用於本局相關規劃設計。固床工之水利探討，雖為野溪整治重要基礎研究課題，但單一主題研究，欲獲致具體成果，建議整合其他相關研究，使研究成果	感謝委員意見，拱型固床工之沖淤研究計畫係探討單一非直線型固床工的衝擊力、能量損失和沖淤狀況，本研究也會納入非直線型固床工一起探討。	P.23

	具實用性。		
6.	請補附參與研究人員學經歷及人力配置、分工。	感謝委員意見，會在附錄補充工作團隊的學經歷及人力配置說明。	P.116
7.	目前文獻蒐集成果良好，特別是對於沖刷回歸參數因子之相關研究已有良好之掌握。	感謝委員的肯定，會依據所蒐集文獻成果進行後續分析。	詳見第二章
8.	數值模擬輸砂性質之擬進行已有初步規劃，流程及執行步驟具體、亦可行。	感謝委員的肯定，會依照所規劃之數值模擬輸砂流程步驟去執行。	詳見第四章
9.	對於研究預計設計不同型式、間距之系列固床工模型部份，目前規劃較不具體，預計有幾種型式及間距，考量之因子及原因，於各場域模擬設置之分配對應等，尚缺乏明確之規劃，請補充說明。	感謝委員意見，本研究以梗枋南勢溪為研究對象，針對不同間距、型式探討。	詳見第四章
10.	P.2 頁版面請再排版修正。	感謝委員意見，已修正。	P.2
11.	按 P.24 預定進度目前所完成固床工文獻蒐集部分，參考工作執行預算書 P5 至 P12，分成固床工水理特性、沖刷回歸參數因子、數值模擬分析三類，為增進了解後續計畫推動時採用的研究方式，建議或可列出各項所蒐集文獻之優缺點，及本研究考量前揭文獻後擬採用方法或參數的原因，以利了解所蒐集文獻的相關性與本研究的開創性。	感謝委員意見，文獻回顧內容會依據委員意見修正。	P.4
12.	部分蒐集文獻未見於附錄一，請補上。	感謝委員意見，已補充於附錄。	P.119

13.	P.15 第 2 段文字敘述二「為」誤字，請修正為二「維」。	感謝委員意見，已修正錯別字。	P.13
14.	報告中提及公式部分漏列參數說明者請補充。	感謝委員意見，已補充參數說明。	P.8
15.	P.21 圖 3-10 模擬「合面」網格誤字，請修正。	感謝委員意見，模式網格已移置模式介紹中。	P.47
16.	P.2 擬採取台灣至少 3 處現地資料部分屆時請說明選取原則或原因，並建議補充所採現地其集水區面積、河道寬度、坡度、粒徑、地質等資訊，以利了解未來建議的固床工設計方式應用的現地條件。	感謝委員意見，選取原則為常流河段、二座以上系列固床工，固床工型式涵蓋直線型和非直線型兩大類。因此，本研究選擇宜蘭縣頭城鎮梗枋南勢溪、大溪溪，以及新北市八里水仙溪為研究對象。	P.28
17.	本計畫探討固床工之間距對泥沙沖淤數值模擬，試問可否針對溪床直線段及彎道段分別求出？建議分別探討後取得結果。	感謝委員意見，本研究會依據委員意見分別針對直線段及彎道段探討泥沙沖淤狀況。	
18.	固床工間距與溪床坡降關係為何？可否探討。	感謝委員意見，水土保持手冊以幾何關係說明溪床坡降越陡峻，固床工間距越需要縮短。本研究會依照委員意見加以深入探討。	P.95
19.	建請加強說明數值模擬之水流條件如何由現地資料轉換取得。	感謝委員意見，數值模擬的水流條件將會採用設計洪峰流量和枯水期流量。	P.36
20.	建請說明模式之參數檢定以及模式驗證方式及所需現地資料。	感謝委員意見，數值模擬現場驗證除了構造物尺寸、河床坡降量測外，還需要流量、河段上下游水位觀測，以及表面粒徑、採樣坑粒徑採樣。	P.66
21.	P3.三、預期成果(一)、(二)請整併入第二章說明即可。	感謝委員意見，會依據委員意見修正。	P.4
22.	本年度計畫延續歷年相關研究成果並創新以高精度航拍	感謝委員的肯定，為提高解析度，本研究使用 RiverFlow 2D 結合	P.71

系列固床工間距對泥砂沖淤之數值模擬探討

	UAV 影像補以 Pix4DMapper 快速影像處理建構平面圖及 3D 模型，精度可達 15cm 內，將應用於計畫河道(固床工)變遷(沖淤)配合 RiverFlow2D 及 SMS 模擬分析相關成果值得期待。	QGIS 進行後續模擬分析。	
23.	請說明本計畫預定建置不同固床型式有哪些?	感謝委員意見，固床工型式包含直線型和非直線型兩大類。	
24.	是否一併分析固床下游兩側(邊界)沖刷分析。	感謝委員意見，沖淤分析範圍涵蓋固床工下游全斷面。	

附錄二、期中審查意見與回覆

期中審查意見回覆			
編號	委員意見	意見回覆	頁數
1.	初步蒐集文獻：固床工水理特性 4 篇、沖刷回歸參數因子 8 篇及數值模擬 5 篇，三大部分合計 17 篇，請續依報告所述擴大收集每部分 10 篇以上，並增列日本相關研究成果，以利完整研究。	感謝委員意見，本研究會擴大增加固床工水理機制各部分主題之文獻並有增列日本相關研究成果，同時也有納入前期計畫之文獻結果以利後續完整研究。	詳見第二章
2.	續上各大部分之文獻蒐集及評估引用，建請以彙整表方式呈現如類別、作者(歐、美、日、國內)、結論、說明，以利閱讀(參考)。	本研究將文獻依後續研究內容分為三大主題—固床工水理、沖刷，最後是模擬分析，將文獻與研究內容前後呼應，並感謝委員意見，會將作者文獻國籍標註於後方以利閱讀。	詳見第二章
3.	本計畫三處現地調查梗枋南勢溪、水仙溪、大溪溪相關地文、水文、現況測量資料粒徑、坡度、水深、土壤密度、流量等，可以表列明細以利比對及後續評估。	感謝委員意見，多項影響因子之資料皆已詳細說明於第四章。	詳見第四章
4.	P90~P93 沖淤趨勢圖探討結果採用 Meyer Peter and Mulek 作為模式輸沙公式之論述及具體評估為何。	感謝委員意見，根據沖淤趨勢圖來看，MPM 之淤積部分最大屬於淺沖深淤型式，也較符合梗枋南勢溪之粗粒徑沖刷型式，且以本團隊所蒐集到之各參數，針對梗枋南勢溪土壤所實驗之輸砂模組參數來看，MPM 較適合作為輸砂公式用。	P.113
5.	後續不同間距範圍對泥沙沖淤是否會影響輸砂模式之適用。	感謝委員意見，輸砂公式之選用多受力竟與坡度之影響，在此三個樣區不同兼具範圍內皆符合 Meyer-Peter and	P.116

		Mueller 公式之適用範圍，且其考慮了混和粒徑，故本研究皆採用此輸砂公式。	
6.	三樣區之水文演算、分析方法、步驟及分析，若太過冗長可考量以附錄方式呈現以利閱讀。	感謝委員意見，關於水文演算、分析方法之內容，本計畫僅以梗枋南勢溪作為示範樣區進行說明。	詳見第三章
7.	固床工形式含直線型及非直線型，探討兼具對泥砂沖淤之數值模擬，是否併予檢討與溪流直線段及彎曲段配置關係。	感謝委員意見，在此三個樣區之模擬中，會有直線段以及彎曲段的沖淤結果呈現，並已詳加說明其與沖淤現象之關係。	詳見第四章第五節
8.	另於陡坡段溪道，固床工兼具已達臨界情形，即已不適用固床工情形下試問其臨界值可否探討求出。	感謝委員意見，根據本計畫所選出三樣區之地形資料來看，並無較陡之坡段可作為參考依據，故期許往後可將此議題詳加討論。	
9.	本案數值模擬以既有固床工為分析對象，考慮 1-23 號、1-15 號、1-6 號固床工之差異進行分析，惟既有固床工間的間距非固定值，且分析 1-23 號為較多座連續固床工的組合，其分析結果沖淤量較低也實屬合理、可預期的。建議採施工前的河床 DSM，考慮不同固床工間距及高度組合進行分析，此作法較容易系統性找出防災與生態保育固床工間距及高度的最佳組合。	感謝委員意見，模擬採用之 DSM 皆是今年度於現場進行空拍作業，故已無法取得施工前之河床資料，期許往後之計畫能將施工前後之河床地形一併進行模擬與探討。	
10.	本計畫以空拍機建置 DSM 進行數值分析，地形高程精度為影響分析成果的重要因子之一，建議檢視合成 DSM 的精度報告及增加檢核點以檢核 DSM 的精度。	感謝委員意見，本研究於內文有進行空拍精度說明空並會將空拍之 DSM 的精度報告納入附錄以供參考。	詳見附錄三
11.	建議本計畫成果可以依據現地環境因子規劃固床工間距及高度的流程圖，以供設計規劃之參考。	感謝委員意見，現有固床工皆為依照當初環境因子之最佳設計，本研究計畫是根據現有不	

附錄二、期中審查意見與回覆

		同種類現地固床工沖淤情況進行數值分析模擬，將研究成果供後續新工程設計規劃參考。	
--	--	---	--

附錄三、期末審查意見與回覆

期末審查意見回覆			
編號	委員意見	意見回覆	頁數
1.	研究完整，條理清晰。依據結論複合型多元固床工包含魚鱗、魚尾及圓弧型階梯跌水工均是能兼顧防災及生態的固床工組合，建議可補充敘述各形式適合區位及對泥沙沖淤影響。	感謝委員讚賞，結論已於第四章第五節中對於各項型式之固床工所適合之區位及對泥沙沖淤影響，期許未來亦可新增多個複合型多元固床工之點位進行更深入的分析與探討。	P151
2.	大溪溪固床工上已經都淤平，變成墊高的河床，固床工如何在往後暴雨提供阻止泥沙挾帶的功能？而歷次對直線段橋樑設施災害潛勢的評估（含治理評估），都指向淤積壓力而非掏刷壓力，強調固床工穩定河床之作用為何？	大溪溪多元型固床工將泥沙淤積控制在大溪溪三號固床工上游避免下游橋梁淤積壓力，且大溪溪固床工為人工排列石塊，模擬天然固床工的型態，乾季淤積於石塊縫隙中之泥沙會隨著雨季挾帶至海岸線。	P147
3.	在相同坡度下若間距縮小，對於穩定河床能力將會上升，惟在生態及經費考量下，能否藉由模式探討最佳間距及型式。	最佳間距及型式需考慮現地狀況，不同溪流的河床粒徑、流量、輸砂量皆不同，需對應現地溪流情勢進行模式模擬提供參考意見。	

附錄四、空拍資料精度分析

Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

- ? Help to analyze the results in the Quality Report
- i Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary i

Project	GANFUN
Processed	2019-08-30 16:41:46
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.34 cm / 1.32 in
Area Covered	0.139 km ² / 13.8924 ha / 0.05 sq. mi. / 34.3466 acres
Time for Initial Processing (without report)	06m.08s

Quality Check i

? Images	median of 22491 keypoints per image	✔
? Dataset	202 out of 202 images calibrated (100%), all images enabled	✔
? Camera Optimization	4.79% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
? Matching	median of 9535.01 matches per calibrated image	✔
? Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

? Preview i



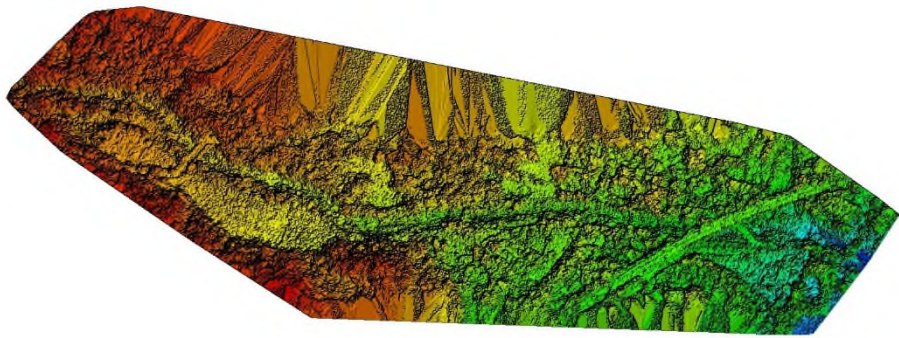


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	202 out of 202
Number of Geolocated Images	202 out of 202

Initial Image Positions

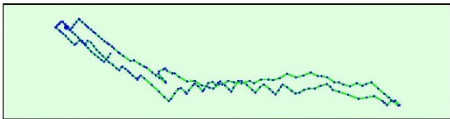


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

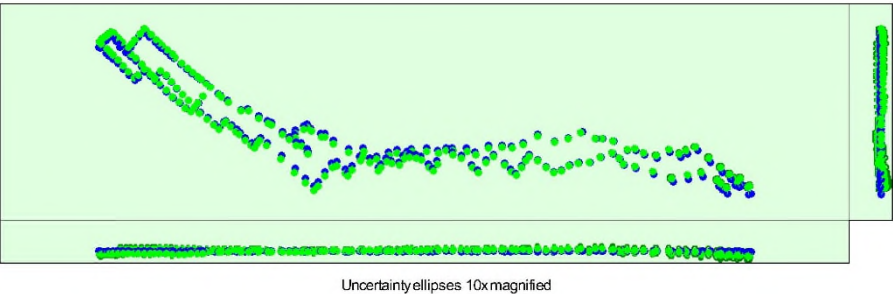


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.225	0.222	0.423	0.111	0.132	0.054
Sigma	0.051	0.049	0.086	0.020	0.004	0.010

In 41 Images	16
In 42 Images	16
In 43 Images	11
In 44 Images	6
In 45 Images	4
In 46 Images	8
In 47 Images	4
In 48 Images	1
In 49 Images	4
In 50 Images	1
In 51 Images	1

2D Keypoint Matches

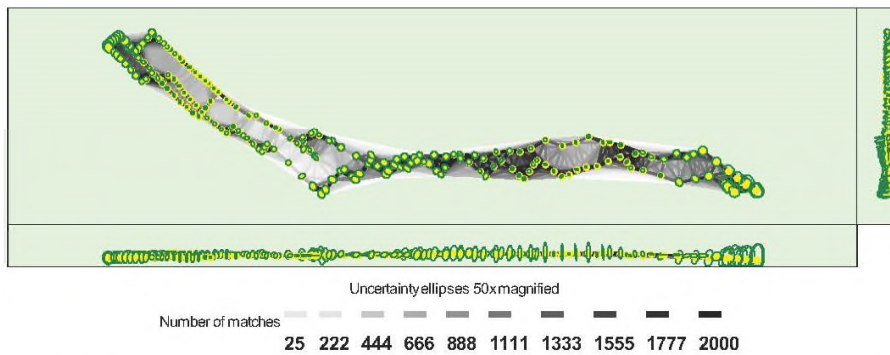


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.063	0.064	0.093	0.135	0.231	0.035
Sigma	0.029	0.030	0.064	0.073	0.040	0.017

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	MaxError [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	4.95	0.00
-6.00	-3.00	0.00	17.33	0.99
-3.00	0.00	55.45	23.76	55.45
0.00	3.00	44.55	28.71	37.62
3.00	6.00	0.00	25.25	5.94
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00

15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		0.041472	0.002597	-0.050871
Sigma [m]		0.781100	3.324111	1.867174
RMS Error [m]		0.782200	3.324112	1.867867

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	91.09	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	123.328
Phi	1.708
Kappa	55.930

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @ 3.70GHz RAM: 16GB GPU: Intel(R) UHD Graphics 630 (Driver: 24.20.100.6291), NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti (Driver: 24.21.14.1170)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 51N (EGM96 Geoid)

Processing Options

Detected Template	3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options



Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	22m:08s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	07m:41s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	14166703
Average Density (per m ³)	65.86

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (3.34 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	06m:56s
Time for Orthomosaic Generation	16m:56s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

Overlap

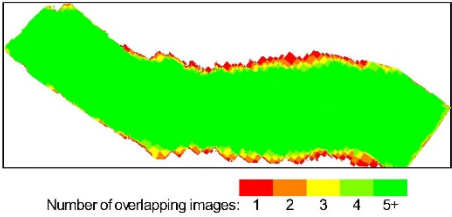


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

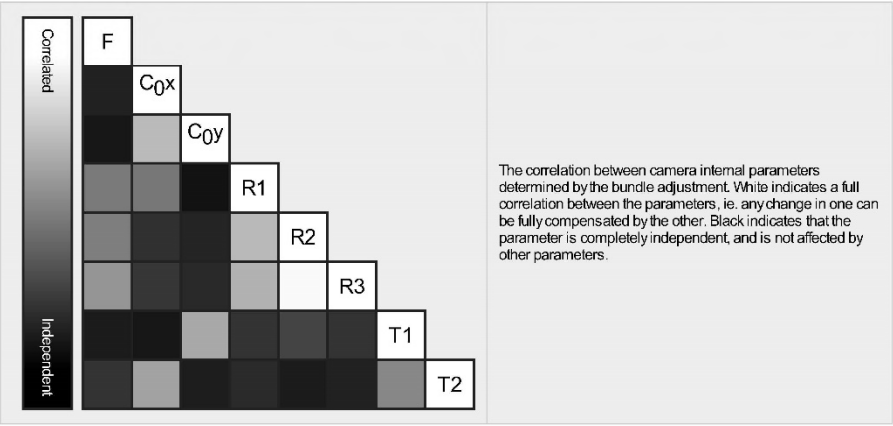
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1946014
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	673612
Mean Reprojection Error [pixels]	0.264

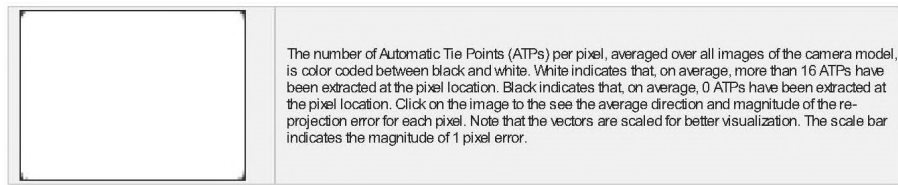
Internal Camera Parameters

FC220_4.7_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.327 [mm] x 4.745 [mm]

EXIF ID: FC220_4.7_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3073.410 [pixel] 4.861 [mm]	1917.790 [pixel] 3.033 [mm]	1485.800 [pixel] 2.350 [mm]	0.033	-0.086	0.078	0.000	-0.001
Optimized Values	3220.687 [pixel] 5.094 [mm]	2089.479 [pixel] 3.305 [mm]	1567.467 [pixel] 2.479 [mm]	0.043	-0.105	0.105	-0.000	0.011
Uncertainties (Sigma)	5.390 [pixel] 0.009 [mm]	2.252 [pixel] 0.004 [mm]	2.282 [pixel] 0.004 [mm]	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000





2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	22491	9535
Min	20005	2732
Max	29916	16431
Mean	22712	9634

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	446908
In 3 Images	113330
In 4 Images	44929
In 5 Images	23262
In 6 Images	13645
In 7 Images	8484
In 8 Images	5728
In 9 Images	4065
In 10 Images	2890
In 11 Images	2121
In 12 Images	1616
In 13 Images	1174
In 14 Images	984
In 15 Images	738
In 16 Images	595
In 17 Images	502
In 18 Images	414
In 19 Images	323
In 20 Images	298
In 21 Images	214
In 22 Images	221
In 23 Images	158
In 24 Images	139
In 25 Images	130
In 26 Images	103
In 27 Images	84
In 28 Images	95
In 29 Images	68
In 30 Images	55
In 31 Images	45
In 32 Images	34
In 33 Images	33
In 34 Images	37
In 35 Images	25
In 36 Images	21
In 37 Images	19
In 38 Images	16
In 39 Images	21
In 40 Images	16

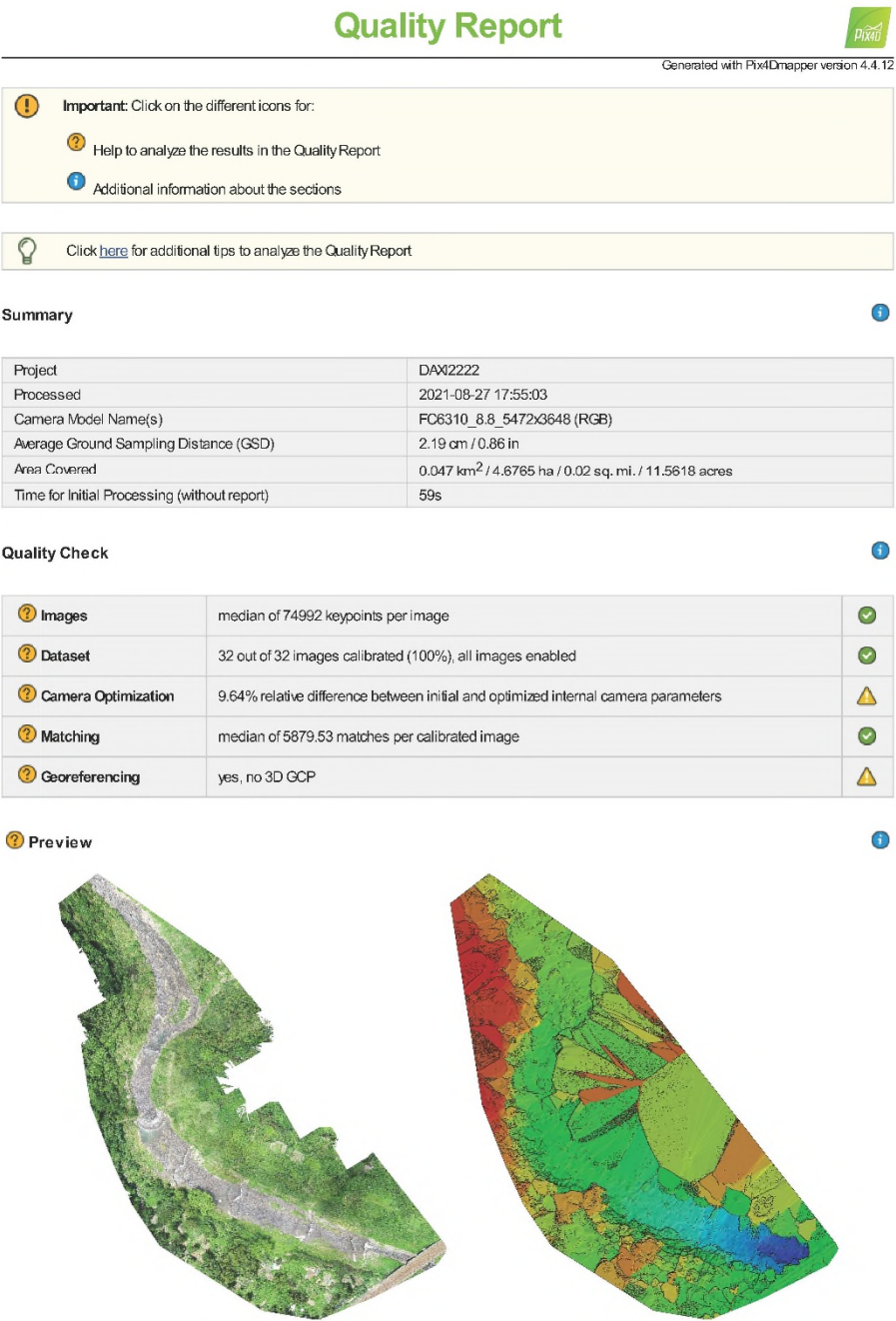


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	32 out of 32
Number of Geolocated Images	32 out of 32

Initial Image Positions

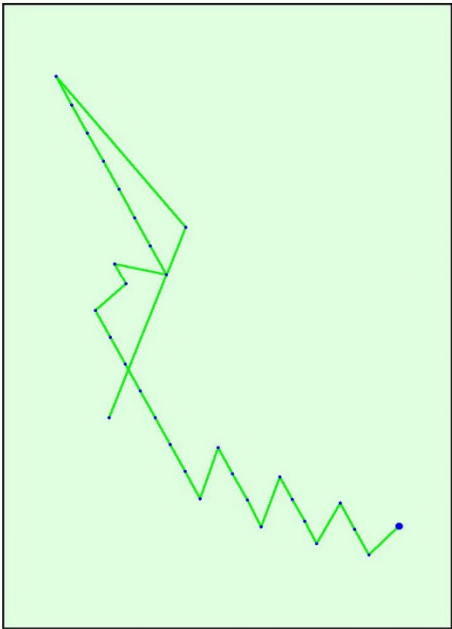


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

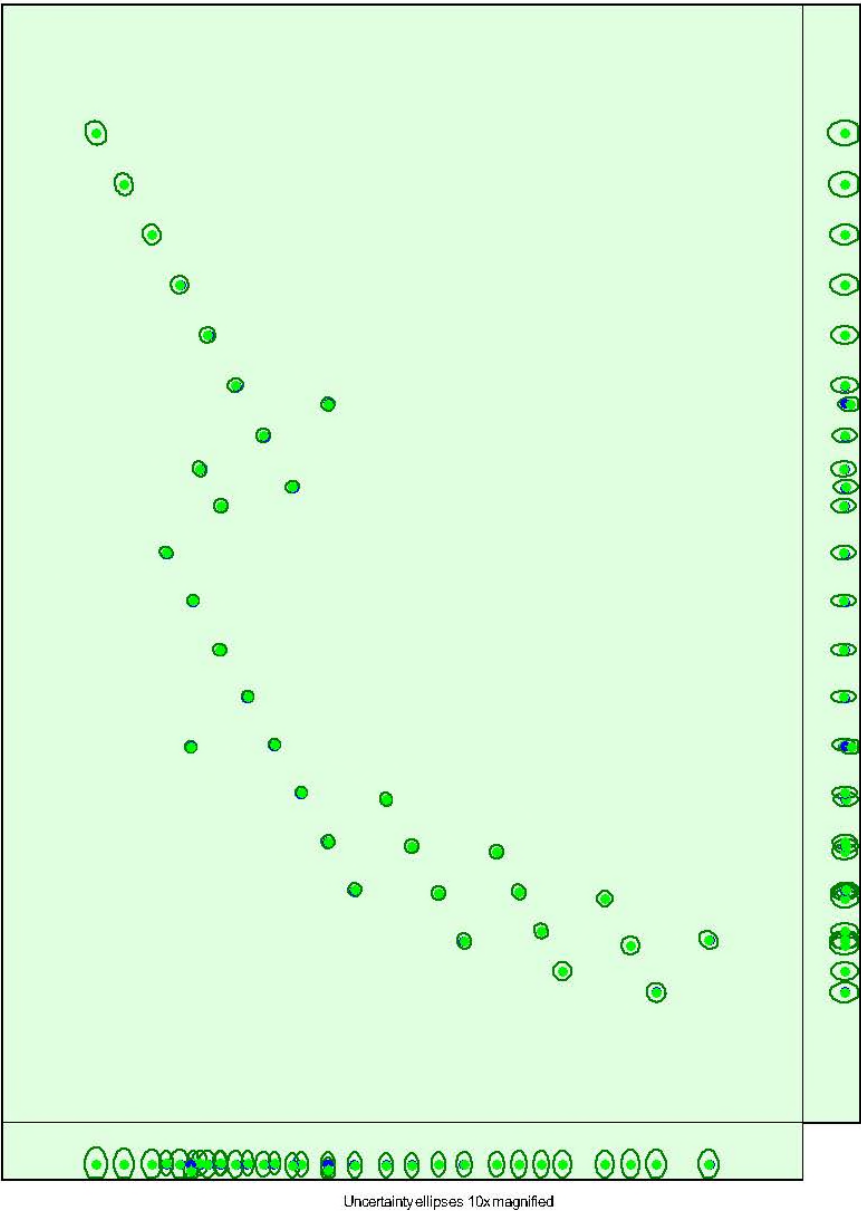


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties

1

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.283	0.289	0.480	0.121	0.130	0.095
Sigma	0.053	0.058	0.045	0.003	0.002	0.000

Overlap

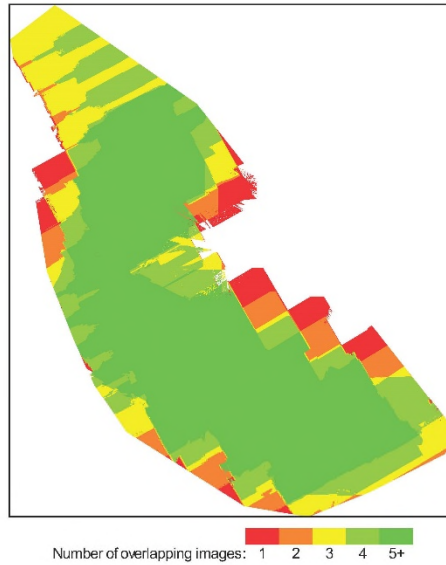


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

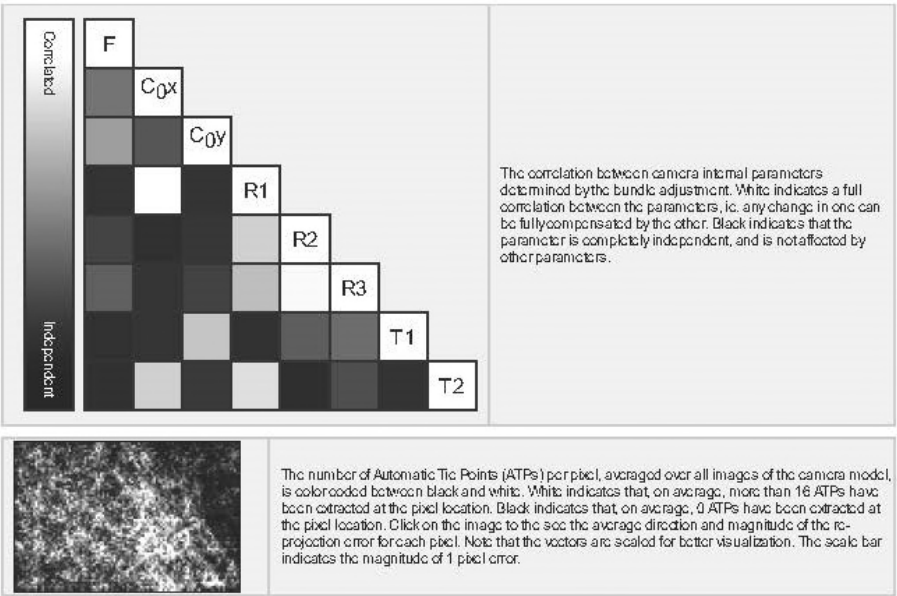
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	177578
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	80047
Mean Reprojection Error [pixels]	0.150

Internal Camera Parameters

FC6310_8.8_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.833 [mm] x 8.556 [mm]

EXIF ID: FC6310_8.8_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3668.759 [pixel] 8.604 [mm]	2736.001 [pixel] 6.417 [mm]	1823.999 [pixel] 4.278 [mm]	0.003	-0.008	0.008	-0.000	0.000
Optimized Values	4022.670 [pixel] 9.434 [mm]	2750.885 [pixel] 6.452 [mm]	1845.917 [pixel] 4.329 [mm]	0.003	-0.013	0.014	0.000	0.001
Uncertainties (Sigma)	15.996 [pixel] 0.038 [mm]	0.714 [pixel] 0.002 [mm]	0.883 [pixel] 0.002 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	74882	5880
Min	68782	800
Max	79832	11548
Mean	74463	5548

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	68264
In 3 Images	8408
In 4 Images	2062
In 5 Images	722
In 6 Images	340
In 7 Images	143
In 8 Images	62
In 9 Images	31
In 10 Images	13
In 11 Images	2

2D Keypoint Matches



Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
--	------	------	------	----------------	--------------	----------------

Mean	0.012	0.014	0.012	0.022	0.025	0.008
Sigma	0.004	0.005	0.009	0.011	0.009	0.003

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	53.12	56.25	68.75
0.00	3.00	46.88	43.75	31.25
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.000612	-0.000061	0.000735
Sigma [m]		0.258264	0.190856	0.603675
RMS Error [m]		0.258265	0.190856	0.603675

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	0.512
Phi	0.661
Kappa	1.954

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-9800X CPU @ 3.80GHz RAM: 128GB GPU: NVIDIA Quadro RTX4000 (Driver: 26.21.14.4128)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 51N (EGM96 Geoid)

Processing Options

Detected Template	3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	02m:11s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	03m:15s

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	5232925
Average Density (per m ³)	188.34

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2.19 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp

系列固床工間距對泥砂沖淤之數值模擬探討

Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	04m:34s
Time for Orthomosaic Generation	02m:09s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

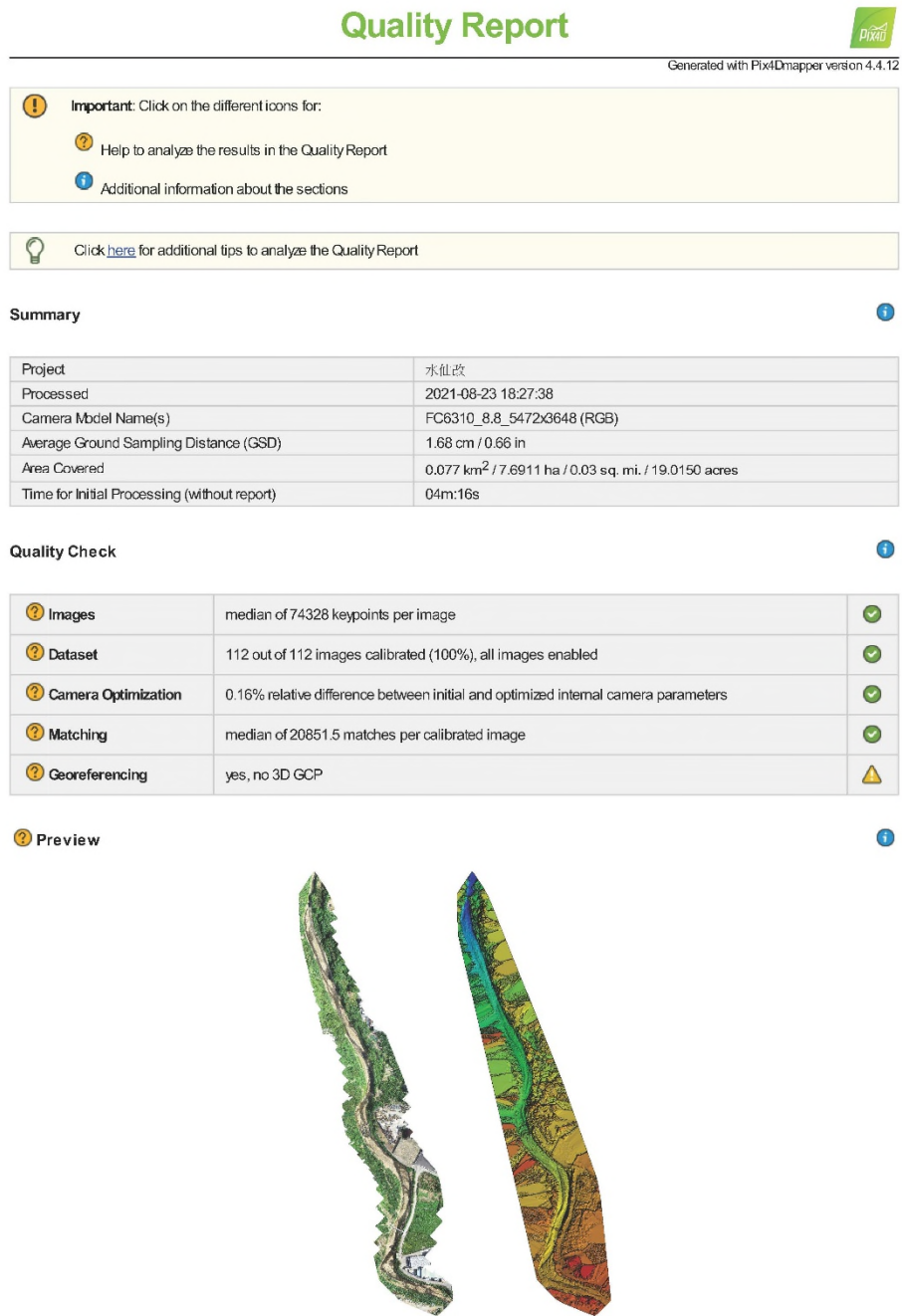


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	112 out of 112
Number of Geolocated Images	112 out of 112

Initial Image Positions

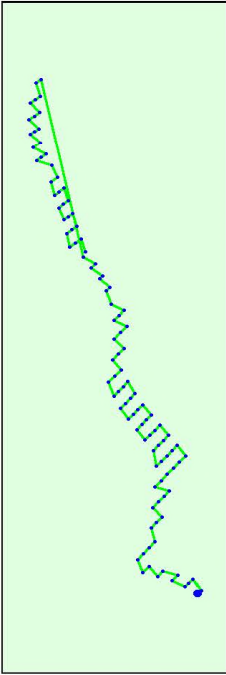


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

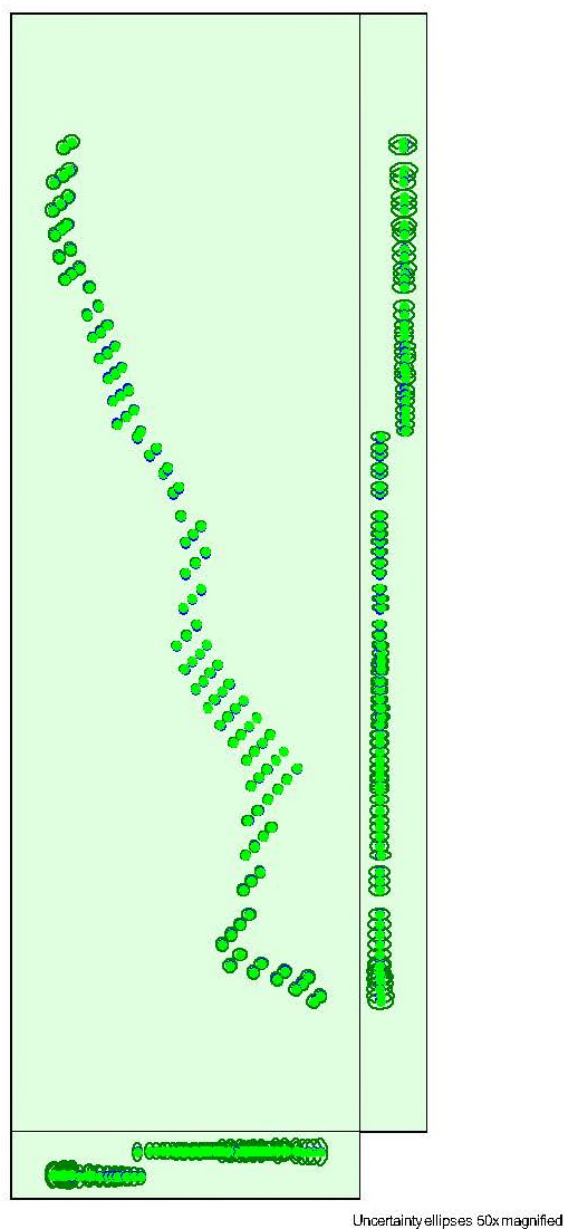


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.089	0.090	0.168	0.040	0.033	0.016

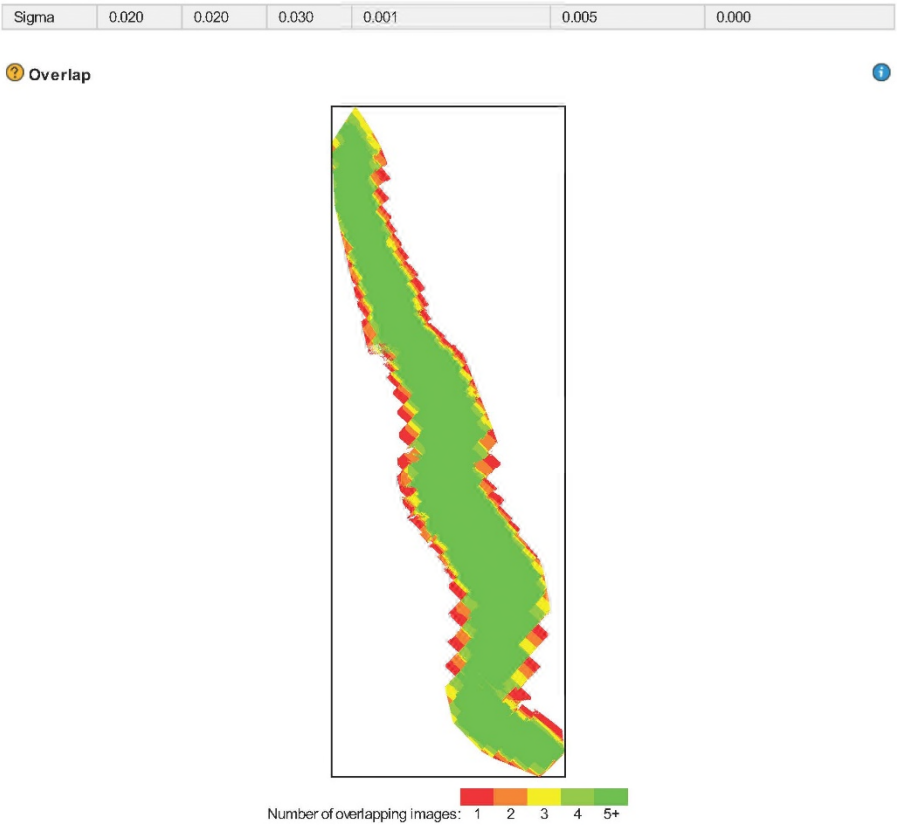


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

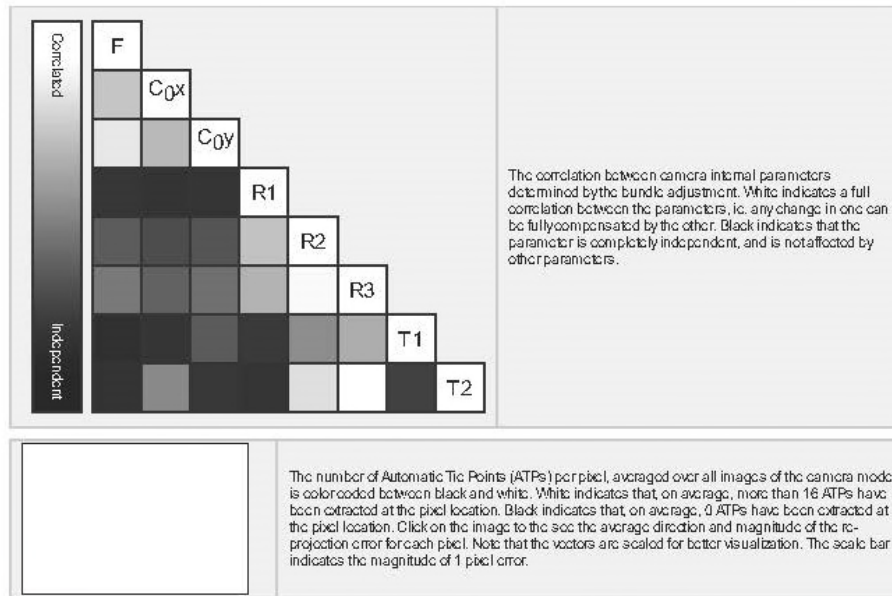
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	2591433
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	879994
Mean Reprojection Error [pixels]	0.147

Internal Camera Parameters

FC6310_8.8_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.833 [mm] x 8.556 [mm]

EXIF ID: FC6310_8.8_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3668.759 [pixel] 8.604 [mm]	2736.001 [pixel] 6.417 [mm]	1823.999 [pixel] 4.278 [mm]	0.003	-0.008	0.008	-0.000	0.000
Optimized Values	3674.855 [pixel] 8.619 [mm]	2750.695 [pixel] 6.451 [mm]	1839.725 [pixel] 4.315 [mm]	0.003	-0.013	0.012	0.000	0.001
Uncertainties (Sigma)	3.181 [pixel] 0.007 [mm]	0.108 [pixel] 0.000 [mm]	0.101 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	74328	29852
Min	63228	7159
Max	79961	47322
Mean	74378	23138

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	568033
In 3 Images	141598
In 4 Images	62545
In 5 Images	35720
In 6 Images	22222
In 7 Images	15096
In 8 Images	10229
In 9 Images	7108
In 10 Images	4890
In 11 Images	3580
In 12 Images	2585
In 13 Images	1738
In 14 Images	1346
In 15 Images	1011
In 16 Images	779
In 17 Images	568
In 18 Images	385
In 19 Images	314
In 20 Images	173
In 21 Images	108
In 22 Images	17
In 23 Images	4

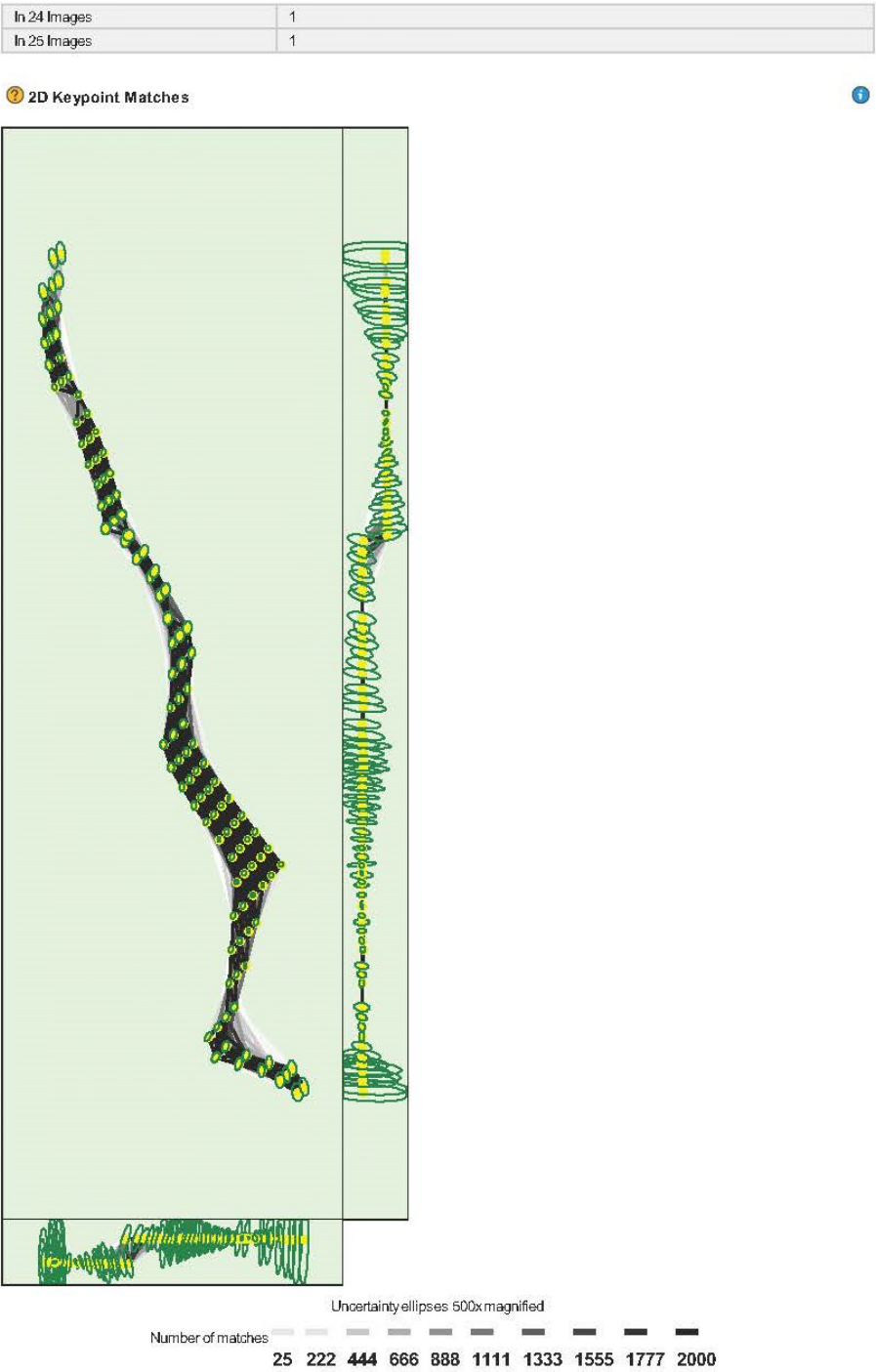


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.005	0.009	0.027	0.036	0.022	0.003
Sigma	0.002	0.003	0.021	0.009	0.016	0.001

Geolocation Details

Absolute Geolocation Variance

Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	39.29	44.64	48.21
0.00	3.00	60.71	55.36	51.79
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.000007	-0.000012	0.000047
Sigma [m]		0.316059	1.036826	0.414848
RMS Error [m]		0.316059	1.036826	0.414848

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]		5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]		0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.086
Phi	0.444
Kappa	2.622

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

系列固床工間距對泥砂沖淤之數值模擬探討

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-9800X CPU @ 3.80GHz RAM: 128GB GPU: NVIDIA Quadro RTX4000 (Driver: 26.21.14.4128)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 51N (EGM96 Geoid)

Processing Options

Detected Template	3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	08m:58s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	05m:16s

Results

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	16575700
Average Density (per m ³)	525.73

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.68 [cm/pixel])
--------------------------------	---------------------------

附錄四、空拍資料精度分析

DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	07m:54s
Time for Orthomosaic Generation	07m:17s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s