

雪霸國家公園管理處委託研究辦理計畫

106 年七家灣溪水文泥砂監測

成果報告

委託單位：雪霸國家公園管理處

執行單位：國立成功大學

計畫主持人：王筱雯 副教授

民國一〇六年十二月

## 中文摘要

### 一、研究緣起

為了安全的考量與臺灣櫻花鉤吻鮭的棲地復育，雪霸國家公園在泥砂與生態等面向之審慎評估後，已於 2011 年 6 月 1 日將七家灣溪一號防砂壩(高度 13 m、淤砂量 20 萬  $m^3$ )完成壩體改善工程。由於壩體改善後，大量泥砂運移將使得河床上下游型態受到改變，進而影響物理棲地環境與水質的變化等鮭魚生存的重要條件。為了瞭解河床演變的趨勢及特性，以掌握結構物改善前後之泥砂運移量與受到不同強度洪水事件之泥砂可能運移位置，必要監測儀器之架設監測與現地河床的水文與泥砂調查與評估不可或缺。

### 二、研究方法及過程

本研究以七家灣溪一號壩上游 1.4 km (觀魚台)至下游 1.8 km (迎賓橋)之 3.2 km 河段為監測範圍，分別於一號壩及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心架設攝影機以完整記錄大水事件及河道變化，並進行七家灣溪萬壽橋(水文監測-水位、流速；泥砂監測-濁度)、一號壩(泥砂監測-濁度)以及觀魚臺(泥砂監測-濁度)三測站之水文泥砂監測。本計畫進行保全區域例行性監測，包含一號壩上游 50 至 200 m 之左岸側向侵蝕情形以及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之淹水潛勢，亦進行溯源侵蝕、側向侵蝕、崩塌地等調查以進一步評估保全措施，並期冀藉由長期且完整的記錄來提供國內後續壩體改善之重要參考依據。

### 三、研究成果

#### 1. 影像監測

根據影像結果顯示 2017 年所發生之降雨事件皆未對壩上游 50 m 至 200 m 左岸邊坡穩固及安全造成威脅，而臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心之影像監測記錄亦顯示河道環境並無明顯變化。

# 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

## 2. 水文泥砂監測

根據 2017 年 1 月 11 日至 2017 年 11 月 16 日水位紀錄顯示，期間七家灣溪經歷兩場較大型之降雨事件，造成水位大幅度變化，分別為 2017 年 6 月 2 日梅雨、6 月 15 日梅雨、7 月 29 日尼莎颱風及 10 月 13 日豪雨，最高水位約 3.57 m (2017/7/29 23:00)。於三場事件之外其他時間，亦有多次大小不一之小型降雨造成水位變化。

6 月 2 日梅雨為今年第一次大雨事件，期間，觀魚臺測站濁度最高為 2,668 NTU (2017/6/4 15:00)，一號壩測站濁度最高值達 1,412 NTU (2017/6/2 18:00)，萬壽橋測站濁度最高值達 1,771 NTU (2017/6/2 18:00)，同一時刻，觀魚臺濁度為 1,114 NTU (2017/6/2 18:00)，由此事件可知濁度在經過拆壩壩體改善影響河段及高山溪匯流後有增加之趨勢，但影響程度僅約 300 NTU。在濁度回復時間方面，觀魚台、一號壩、萬壽橋測站濁度達尖峰值後，分別經過 34、50、64 小時後回復至事件發生前之濁度值，顯示濁度值越高的測站，其濁度恢復需越長的時間。

## 3. 斷面調查

根據縱斷面結果顯示，目前上游溯源侵蝕點及下游淤積點大致與 2016 年成果一致，並無明顯變化；針對 S23、S18 及 S17-1 橫斷面調查結果，兩場梅雨事件與尼莎颱風並未造成上游 S23 斷面(0K+48)明顯沖淤，斷面侵蝕面積僅增加約 2 m<sup>2</sup>，並且無側向侵蝕情形發生；下游臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心之 S18 與 S17-1 斷面，則有河道下刷情形，斷面淤積面積分別減少 7 m<sup>2</sup> 及 15 m<sup>2</sup>。

## 4. 河道通洪能力

由 2017 年 11 月之資料顯示，目前臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心之通洪能力皆大於 20 年重現期，目前尚無須以清淤方式調整河道通洪面積及河段坡度。

## 5. 流量推估

本團隊除藉由 2011 年至 2015 年各事件之萬壽橋水位與台灣電力公司流量站七家灣溪流量(七家灣與有勝溪流量站之流量資料差值)以及本團隊 2017 年 6

月 2 日梅雨、7 月 29 日尼莎颱風、10 月 13 日豪雨之水位及流量資料，建立萬壽橋水文測站之水位流量率定曲線(如式 3)，可供管理單位即時推估使用，惟現有資料筆數太少，流量推估之水位適用範圍為 1.19~4.75 m。

$$Q=61.287*(13.05-H)^2-220.68*(13.05-H)+221 \quad (\text{式 3})$$

其中，Q 為七家灣溪流量，H 為萬壽橋水位站儀器水位記錄值(雲端即時資料 <http://wra.procal-tech.com/Login.aspx?ReturnUrl=%2f>)。

## 6. 崩塌地調查

根據 2017 年 10 月空拍影像成果得知，壩上游 250 m 處之崩塌面積由 2016 年 11 月之 2,662 m<sup>2</sup> 更進一步降至 1,426 m<sup>2</sup>，其結果顯示崩塌面積呈現縮小趨勢，在未有進一步崩塌發生且崩塌處植生逐漸回復下，裸露地面積有逐年縮小之趨勢。

## 7. 監測指標

由監測結果得知，今年七家灣溪最大之水文事件為 6 月 2 日梅雨事件(兩年重現期距流量)，且並未對河道環境造成不可預期之影響，顯示王筱雯(2016)所提出之監測指標與作業方式對河道環境變遷能有一定之掌握，因此尚無調整之必要。本委託辦理計畫依據監測評估資料與河道變遷指標及作業方式提出供管理單位經營管理參考之建議，如下：

### (一) 即時監測

臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心為雪霸國家公園內重要保護標的，本研究提出「24 小時內累積雨量大於 300 mm」、「萬壽橋水位站即時水位大於 4.75 m」等兩對應之淹水潛勢監測指標，目前雪霸國家公園萬壽橋水位站之水位計與流速儀已架設完成並開始監測，本研究依據 2011 至 2017 年水文事件記錄，建立萬壽橋水文測站之水位流量率定曲線(式 3)，供管理單位即時推估使用，惟現有資料筆數太少，建議持續進行水文監測。

## (二) 保全區域例行性監測

### 1. 一號壩

針對一號壩上游 50 至 200 公尺之左岸側向侵蝕情形，以現地河床橫斷面高程調查輔以影像監測掌握河岸狀況，進一步評估保全措施。

### 2. 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心

針對臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之淹水潛勢，以現地河床縱橫斷面高程調查輔以水文及影像監測掌握保全區域之河道狀況，以做立即性之應對。

### 3. 河道環境

針對河道環境變遷的掌握，除定點監測儀器與現地調查外，於汛期前後或重要水文事件前後進行空拍機影像拍攝，可以更即時及全面性的了解河道環境變遷，如崩塌地面積的增減、河道流路變遷、河岸狀況等，亦可作為未來相關河道環境規劃之基礎資料。

## (三) 長期監測

七家灣溪河道在不同強度水文事件(表 3-1)下之環境變動性與複雜性高，壩體改善至今辦理之相關監測已六年，但對於掌握河道整體環境狀況仍需持續且全面之調查，明年度調查項目建議可參考本委託辦理計畫所提出之監測指標，包含側向侵蝕(調查頻度：1 年，最新調查為 2017 年 11 月 11 日)、溯源侵蝕(調查頻度：1 年，最新調查為 2017 年 11 月 11 日)、坡地植被裸露(調查頻度：1 年，最新調查為 2017 年 11 月 11 日)、侵蝕土方量變化(調查頻度：2 年，最新調查為 2016 年 11 月 14 日)以及物理性棲地變遷(調查頻度：3 年；葉昭憲，2015)等，另建議管理單位持續針對七家灣溪一、三、四號壩及二號壩殘留壩體的安全性持續進行調查與了解，以進一步評估壩體安全對於下游保全標的之影響。

目錄

中文摘要 .....	I
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XI
第一章 計畫緣由 .....	1
第二章 計畫目標 .....	3
2.1 工作內容.....	3
2.2 預期目標.....	3
第三章 前人研究 .....	5
3.1 環境背景資料.....	5
3.2 案例研究.....	6
3.3 壩體改善與河道環境相關研究.....	22
3.4 問題初探.....	36
第四章 研究地區 .....	37
4.1 地文資料.....	37
4.2 水文資料.....	39
4.3 航照圖資料.....	41
4.4 崩塌地與岩盤判釋.....	46
4.5 河床質資料.....	49
第五章 影像監測與現地調查 .....	53
5.1 定點監測.....	53
5.2 現地監測.....	63
第六章 監測指標 .....	87
第七章 結論與建議 .....	93
第八章 主要參考書 .....	97

106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

附錄一 期末審查意見回覆 .....101

## 圖目錄

圖 3-1 壩體改善歷程 .....	6
圖 3-2 將 Marmot Dam 下游鮭魚撈起.....	8
圖 3-3 壩體改善後即時影像圖 .....	8
圖 3-4 各階段時間序列泥砂含量圖 .....	9
圖 3-5 Marmot Dam 溯源侵蝕終點遷移歷程.....	10
圖 3-6 影像監測 .....	12
圖 3-7 水文泥砂監測 .....	13
圖 3-8 Condit Dam (a)壩體改善前(2011/08)；(b)爆破中(2011/10/26).....	15
圖 3-9 潰壩後上游之時間序列圖 .....	15
圖 3-10 巴陵壩現場照 .....	21
圖 3-11 模擬巴陵壩潰壩後-河床縱斷面模擬結果.....	21
圖 3-12 巴陵壩潰壩後-穩定性指標(K)與經過年數之關係圖 .....	21
圖 3-13 壩體改善後河相演變時間示意圖 .....	23
圖 3-14 不同泥砂淤積高度與組成運移關係圖 .....	23
圖 3-15 七家灣溪河道演變模式 .....	24
圖 3-16 壩體改善與研究發表：(a)累積壩體改善數量與每年研究發表數量；(b)改善壩體之壩高與研究發表數量相對百分比 .....	27
圖 3-17 壩體改善資訊入口-七家灣溪與高山溪案例.....	29
圖 3-18 各年代壩高小於 10 m 及大於 10 m 之壩體改善數量 .....	34
圖 3-19 不同泥砂組成與侵蝕土方量之關係 .....	35
圖 3-20 壩體改善後河流反應概念 .....	35
圖 4-1 七家灣溪集水區 .....	38
圖 4-2 七家灣河流域高程圖 .....	38



圖 4-3 七家灣河流域坡度圖 .....	38
圖 4-4 七家灣河流域地質圖 .....	38
圖 4-5 雨量站站況及 2017 年日雨量 .....	39
圖 4-6 萬壽橋水位測站之時水位資料 .....	41
圖 4-7 七家灣溪歷年航照圖(1/2) .....	43
圖 4-7 七家灣溪歷年航照圖(2/2) .....	44
圖 4-8 1980 年~2016 年河道變遷情形 .....	45
圖 4-9 七家灣流域 2001、2002、2009 年崩塌地變遷 .....	46
圖 4-10 岩盤與崩塌地判釋 (a) 上游崩塌及岩盤裸露區域 (b) 下游崩塌及岩盤 裸露區域.....	48
圖 4-11 新舊崩塌地比對 .....	48
圖 4-12 七家灣溪一號壩明坑挖掘下游各區粒徑級配比較圖 .....	49
圖 4-13 七家灣溪各樣站底質採樣結果比較 .....	51
圖 4-14 七家灣溪底質比例 .....	51
圖 5-1 水文、泥砂及影像監測系統相關照片 .....	54
圖 5-2 七家灣溪一號壩測站監測影像 .....	55
圖 5-3 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心測站監測影像 .....	55
圖 5-4 萬壽橋水文測站-水位 .....	57
圖 5-5 萬壽橋水文測站-流速 .....	59
圖 5-6 水文測站濁度(a)觀魚臺、(b)一號壩、(c)萬壽橋與(d)萬壽橋水位 .....	62
圖 5-7 S23 斷面左岸河道環境 .....	64
圖 5-8 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心河道環境 .....	65
圖 5-9 七家灣溪縱斷面調查成果 .....	69
圖 5-10 S23 斷面(0K+48) .....	71
圖 5-11 S18 斷面(0K-801) .....	72

圖 5-12 S17-1 斷面(OK-880) .....	74
圖 5-13 斷面面積變動量 .....	74
圖 5-14 斷面最大可通洪流量 .....	76
圖 5-15 洪水期間水位-流量之遲滯現象示意圖 .....	78
圖 5-16 流量推估流程 .....	79
圖 5-17 流量推估成果 .....	81
圖 5-18 2011-2017 年各事件尖峰流量-水位率定曲線圖 .....	81
圖 5-19 崩塌地泥砂量推估方法與模式 .....	82
圖 5-20 2017 年崩塌地套繪成果 .....	85

# 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

## 表目錄

表 3-1 高山溪與七家灣溪防砂壩興建及改善紀錄表 .....	17
表 3-2 高山溪攔砂壩興建及改善紀錄表 .....	18
表 3-3 Dam Removal: A Synthesis of Existing Science and Its Implications for the Practice 場次論文列表.....	25
表 4-1 七家灣流量站與臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心各重現期距對應之流量 .....	40
表 5-1 水位計至河床距離與量測時間 .....	57
表 5-2 2011~2017 年各事件最高水位值 .....	58
表 5-3 河道地形測量方法比較 .....	64
表 5-4 各河段河道坡度表 .....	67
表 5-5 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道坡度 .....	68
表 5-6 邊坡坡度與崩塌深度關係對照表 .....	83
表 5-7 滑動面積與代表性深度對照表 .....	83
表 5-8 崩塌地面積變遷 .....	84
表 6-1 七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之監測指標 .....	89
表 6-2 七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之作業方式(1/2) .....	90
表 6-2 七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之作業方式(2/2) .....	91



## 第一章 計畫緣由

為了復育臺灣櫻花鉤吻鮭的棲地連續性，雪霸國家公園處於 2011 年五月底將七家灣溪主流上高度 13 m、庫區已淤滿的一號防砂壩進行左側壩體的改善。一號壩改善工程進行階段，為了施工安全的考量，施工單位先行對壩體上游之淤砂進行整理與篩選，並回填至壩體下游右岸處，待回填砂石穩定與河道導引工程完成後甫以怪手與破碎機進行壩體改善工程。

壩體改善後的數月內，溯源侵蝕以拋物面狀的方式向上游傳遞。根據王筱雯(2011)河道縱斷面調查監測結果，溯源侵蝕終點自壩體改善後第一場洪水事件往上游延伸至壩上 200 m 處後，其侵蝕速度即減緩；而壩下游泥砂堆積範圍持續往下游延伸，壩下游 500 m 處的淤積形成平坦且緩慢的流況，且主深槽擺盪明顯並偏向右岸，此外，原本淤積於壩體後方之細顆粒被帶往下游，故下游粒徑較壩體改善前細化。

根據河道演變模式(Channel Evolution Model)，由於壩體改善形成的河川沖淤變化，包括大量泥砂運移、河床上下游型態改變，可能造成上游河道左右河岸坍塌，讓原始河道變寬，切割作用而改變斷面之形狀、淤積之泥砂輸送至下游，增加輸砂量，使得河床部分抬高，且鮭魚生存環境與水質等的重要之物理棲地條件可能會受到衝擊。

因七家灣溪一號壩壩體改善後造成河床上下游型態改變，本委託辦理計畫針對上游河床下切與下游河床淤高之影響，持續進行七家灣溪水文監測，並進一步對七家灣溪河道環境中因河相改變而對保全區域之可能影響深入分析，期望藉由長期的環境調查與紀錄提供國內壩體改善後河相變化之與環境衝擊之重要參考依據。

# 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

## 第二章 計畫目標

### 2.1 工作內容

#### (一) 工作地點及範圍

本計畫以七家灣溪一號壩上下游約觀魚臺至萬壽橋處之河道，以及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周邊環境。

#### (二) 工作項目

1. 辦理七家灣溪觀魚臺、一號壩及萬壽橋水文測站之濁度紀錄。
2. 辦理七家灣萬壽橋水文測站之水位、流速記錄，並搭配現場調查進一步推估七家灣溪流量。
3. 辦理七家灣溪一號壩左岸及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道影像記錄，並分析洪水事件所造成之河道環境變遷。
4. 計算豐水期前後臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道可通洪流量。
5. 調查七家灣溪一號壩改善後上下游之河道狀況，包含縱橫斷面調查、溯源侵蝕、側向侵蝕、崩塌地調查等。

### 2.2 預期目標

1. 藉由七家灣溪水文測站資料瞭解七家灣溪流量變化。
2. 藉由現地調查與評估，瞭解洪水期間河道之變遷。
3. 評估壩體改善後對下游保全區域淹水之潛勢。
4. 依據監測評估資料，提出環境維護與適應性管理之建議，並規劃七家灣溪一壩壩體改善後河道變遷之監測指標及作業方式。



# 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

### 第三章 前人研究

#### 3.1 環境背景資料

七家灣溪位於德基水庫上游集水區，為攔阻水庫集水區上游泥砂，自 1971 年起陸續興建 12 座大型防砂壩；七家灣溪一號壩為七家灣溪流最下游的壩體，興建於 1972 年，壩高 13 m，壩體改善前攔砂量約達 200,000 m<sup>3</sup>(王筱雯，2010)。一號壩壩基因受水流衝擊淘刷已被破壞而有安全上的疑慮，加上此溪為臺灣櫻花鉤吻鮭唯一棲地，防砂壩的存在阻絕了鮭魚上溯的洄游路徑。基於上述理由，主管機關雪霸國家公園針對一號壩壩體改善的方式、時機、與可能衝擊，就水文與水理、泥砂與河相、生態與棲地、生態檢核評估及保育效益、民意調查等不同面向評估後，雪霸國家公園參考(王筱雯，2010)針對壩體改善後河道泥砂量、泥砂質、泥砂粒徑與河道主深槽等對河防安全與生態棲地之可能衝擊所建議之壩體改善方式，於 2011 年 5 月 25 日進行為期一週之壩體改善工程，壩體改善過程如圖 3-1。於壩體改善施工前先行遷移受七家灣溪一號壩影響河段之櫻花鉤吻鮭上百隻並安置於種源庫，以避免壩體改善時河道內濁度過高而危及臺灣櫻花鉤吻鮭。考量施工安全，施工單位先對壩體上游之淤砂進行整理與篩選，以作為右側壩體下方之回填材料，並將溪流導引至左岸(如圖 3-1-A)。隨後開始進行壩體左側 1/3 壩體之改善(圖 3-1-B)，壩體於 2011 年 6 月 1 日改善完成(圖 3-1-C)(王筱雯，2011)。

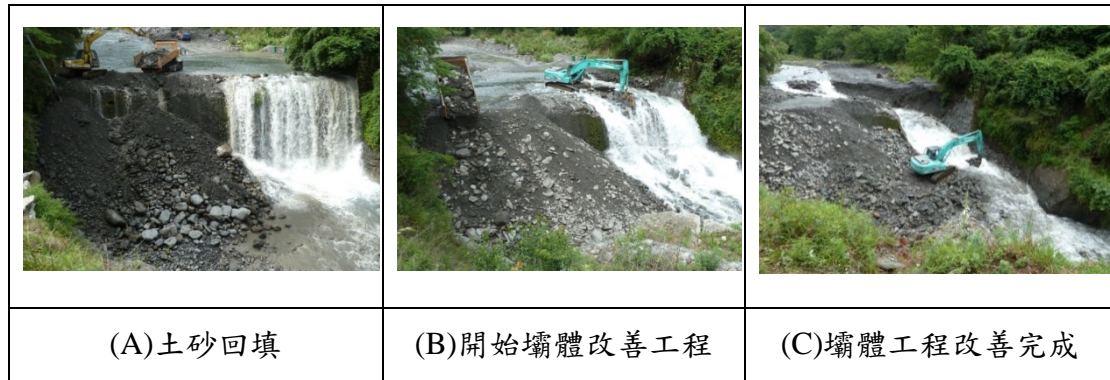


圖 3-1 壩體改善歷程 (王筱雯, 2011)

壩體改善完成後，成功大學王筱雯團隊持續針對水文及河相進行監測。王筱雯(2013)斷面調查成果顯示，壩體改善後至 2012 年 2 月 13 日，由於米雷颱風及東北季風事件，使得溯源侵蝕終點約上溯至壩上游 200 m 處，侵蝕土方量約 20,000 m<sup>3</sup>。2012 年經歷梅雨、泰利颱風及蘇拉颱風後，於 2012 年 9 月 9 日調查發現溯源侵蝕終點已延伸至壩上游 800 m 處，侵蝕土方量約較上次測量增加 125,000 m<sup>3</sup>。2013 年經歷蘇力及潭美颱風，溯源侵蝕段終點於 2013 年 10 月 24 日調查並未持續向上延伸，上游侵蝕土方量約較上次測量增加 15,000 m<sup>3</sup>。於 2016 年 11 月 14 日調查發現並未持續向上延伸，上游侵蝕土方量約較上次測量增加 22,000 m<sup>3</sup>，總計壩上游河段約近 182,000 m<sup>3</sup> 之泥砂量被帶往至下游。

### 3.2 案例研究

有關壩體改善的相關研究，國外至今已累積無數經驗，這些案例在不同環境背景下之目的，包括壩體老舊的安全顧慮，或原有功能喪失時之重新思考，以提供洄游性魚類通道或擴增魚類棲地之用等。國外的壩體改善原因，除了生態層面的考量(如暢通魚類洄游通道、棲地與河流生態考量)之外，安全層面(如因壩體老舊或損壞而有安全顧慮)與經濟效益層面(壩體原興建功能已經喪失、原有功能被取代、或功能經評估不符經濟效益)的考量，皆是促成改善壩體之可能原因(王筱雯等人, 2013)。當壩體改善後，大量的泥砂運移將使得河床上下游型態受到改變，進而可能對物理棲地環境、水文、水質以及人類活動造成影響，因此壩體改善前後持續性的監測有其必要性。

(一) 國外案例

1. Marmot Dam

Marmot Dam 位於美國奧勒岡州 Sandy River，因發電與供水需求而興建於 1909 年，集水區面積約 1316 km<sup>2</sup>，其壩高 15 m。根據 Stewart and Grant (2005)，Marmot Dam 於壩體改善前攔蓄近 750,000 m<sup>3</sup> 的粗細粒徑的泥砂，淤砂坡度向上游延伸了近 3.5 km。由於 Marmot Dam 隔絕魚類往來的通道造成魚類洄游問題，且在 1989 年時已失去原本的功效，而在 1999 年時，波特蘭電力公司(Portland General Electric, PGE)開始評估將其改善的規劃，一方面為避免潰壩造成的危險，一方面也希望幫助野生鮭魚在 Sandy River 之復育。

Marmot Dam 改善計劃於 2007 年 7 月 24 日開始。Marmot Dam 的改善方式主要與建壩時相同。首先將水位降低，於原壩址上游設置以當地土石材質，所堆置成暫時性圍堰(coffer dam)將水導開後，再針對混凝土壩體以炸藥進行爆破，混凝土壩體結構於九月底全數改善。同年 10 月，生物學家先行遷移數百條在影響河道範圍的魚類，移至相關養殖區放置，以免在壩體改善後，泥砂所造成河道濁度飆高，使得當地鮭魚的滅亡，如圖 3-2。在 Marmot Dam 壩體改善後，隨著一場颱風事件後，上游所堆置成暫時性圍堰將會被侵蝕而倒塌，其歷經過程如圖 3-3 所示(王筱雯，2010)。

波特蘭電力公司、其他相關政府、學術單位及私人企業等為掌握壩體改善前後河床演變特性與趨勢，於 2000 年開始進行相關監測，監測項目包含：(1)壩上下游流量、泥砂監測；(2)河道地形調查；(3)影像監測(壩體改善期間)；(4)溯源侵蝕點遷移；(5)河床質調查。

根據 Cui et al. (2006)監測結果，由圖 3-4 各階段泥砂含量時間序列圖，可知圍堰被沖毀後的數小時內，泥砂濃度上升，但約 12 小時後，則趨於回穩。根據調查，魚類往上洄游多了近 150 km 的棲地可供利用，已在原壩址上游發現為數不少的鮭魚(王筱雯，2010)。Major et al. (2012)透過影像監測及地形量測，分析潰

106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

壩後溯源侵蝕點遷移(圖 3-5)及侵蝕土方量。潰壩後 60 小時，溯源侵蝕終點已上溯至壩上游 400 m，溯源侵蝕速率約 480~4800 m/day，總計約 125,000 m<sup>3</sup> 土方量(佔原庫區之 17%)被帶往下游。潰壩後 11 個月(2008 年 9 月)，溯源侵蝕終點上溯至壩上游 2 km，壩體改善後累計約 373,000 m<sup>3</sup> 土方量(佔原庫區之 50%)被帶往下游。



圖 3-2 將 Marmot Dam 下游鮭魚撈起 (<http://www.marmotdam.com/>)



圖 3-3 壩體改善後即時影像圖 (<http://www.marmotdam.com/>)

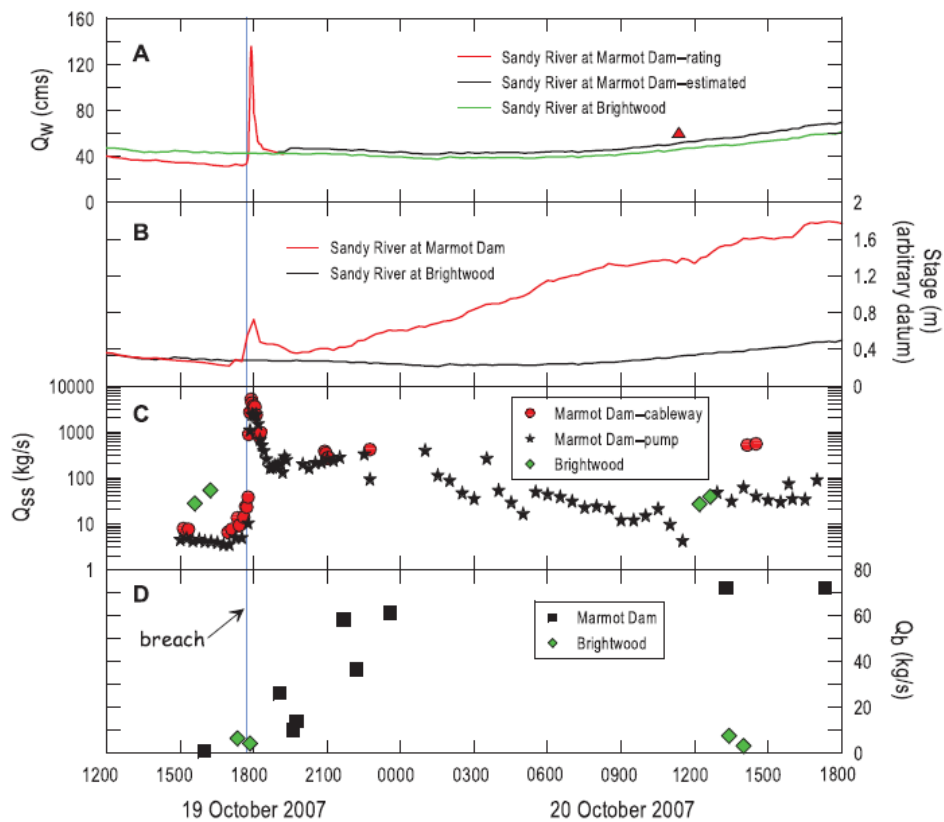


圖 3-4 各階段時間序列泥砂含量圖 (Cui et al., 2006)

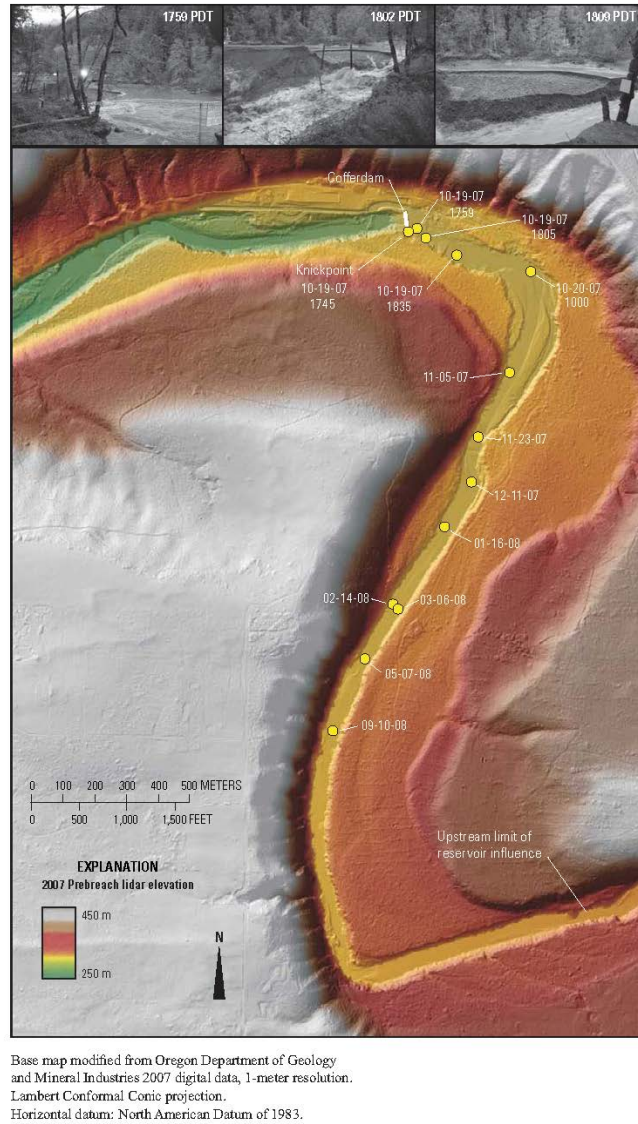


圖 3-5 Marmot Dam 溯源侵蝕終點遷移歷程 (Major et al, 2012)

## 2. Elwha Dam 與 Glines Canyon Dam

Elwha Dam 位於美國華盛頓州 Elwha River 上、Strait of Juan de Fuca 出海口上游 7.4 km 處，因伐木業與造紙業之用电需求而興建於 1913 年，其壩體為混擬土重力壩，壩高 32 m，蓄水後形成容量約為 9.83 Mm<sup>3</sup> 的 Aldweel 湖。Glines Canyon Dam 位於 Elwha Dam 上游 14.2 km 處，同因用电需求而興建於 1927 年，其壩體為混擬土拱壩，壩高 64 m，蓄水後形成容量約 49.17 Mm<sup>3</sup> 的 Mills 湖。兩座大壩以發電為主要目的，須長年保持滿水位以達發電最大效益，因此不具有防洪與供水效益。根據 U.S. Department of Interior (1996) 調查，Elwha Dam 與 Glines

Canyon Dam 庫區影響上游超過 9 km 河段，因而減少洄游性鮭魚將近 90%之棲息地，且由於攔阻上游泥砂與木材於庫區，減少了有機質傳輸且造成下游水溫升高(Wunderlich et al., 1994)。Elwha Dam 於壩體改善前攔蓄近 5 Mm<sup>3</sup>的泥砂，泥砂組成為 47%的泥、黏土與 53%的粗粒徑泥砂；Glines Canyon Dam 於壩體改善前攔蓄近 16 Mm<sup>3</sup>的泥砂，泥砂組成為 44%泥、黏土與 56%粗粒徑泥砂(Randle et al., 2014)。為恢復魚類洄游廊道並復育 Elwha River 生態系統，Olympic National Park 於 2011 年 9 月 17 日開始進行壩體改善工程。Elwha Dam 與 Glines Canyon Dam 改善工程係採用分段改善的方式進行，考量魚類可能因工程所造成的濁度升高而無法上溯產卵，改善工程於每年 11 月 1 日至 12 月 31 日、5 月 1 日至 6 月 30 日以及 8 月 1 日至 9 月 15 日期間暫停，以降低壩體改善過程對下游設施及生態系統的負面影響。至 2013 年 9 月中為止，Elwha Dam 已完全改善完畢，Glines Canyon Dam 則於 2014 年夏天改善完成。

美國地質調查所(USGS)與墾務局(USBR)等相關政府、學術單位等為掌握壩體改善前後河道演變特性及建立河道泥砂收支系統，持續進行相關監測，監測項目包含：(1)水位、泥砂監測；(2)河道地形監測；(3)影像監測(圖 3-6)；(4)溯源侵蝕遷移監測；(5)河床質調查；(6)航照圖監測。

USGS 於 Glines Canyon Dam 下游共設置七處水文測站，其中三測站位於 Elwha Dam 下游，另於 Elwha Dam 下游設置一泥砂測站(圖 3-7-A)。於 2011 年 9 月至 2013 年 9 月監測期間，由流量監測結果可知，壩體改善期間發生多場小於兩年重現期距的降雨事件(圖 3-7-E)，其中，最大強度事件發生於 2011 年 11 月 23 日，尖峰流量約為 291 cms。於 2012 年 10 月 31 日豪雨事件(尖峰流量約 150 cms)期間，輸砂率數日超過 1000 ton/day (Rkm 5.1，圖 3-7-D)，且大多數水位測站(除 Rkm 12.4 外)之記錄皆顯示發生 0.5 至 1.5 m 不等的淤積(圖 3-7-B、圖 3-7-C)；2012 年 11 月 1 日至 14 日期間，位於 Aldwell 湖淤積三角洲上的 Rkm 12.4 的測站則因河道溯源侵蝕而下切 0.4 m，指出溯源侵蝕終點在大流量時才開始遷



移(圖 3-7-B)。East et al. (2014)研究成果顯示，水位監測除反應水文事件外，亦可反應豪雨造成泥砂往下游傳遞過程。截至 2013 年 9 月中為止，兩壩庫區總計約 7.1 Mm<sup>3</sup> 的土方被帶往下游，造成河道普遍淤積高度約 1 m，河道型態由潭瀨演變為辮狀河道(East et al., 2014)

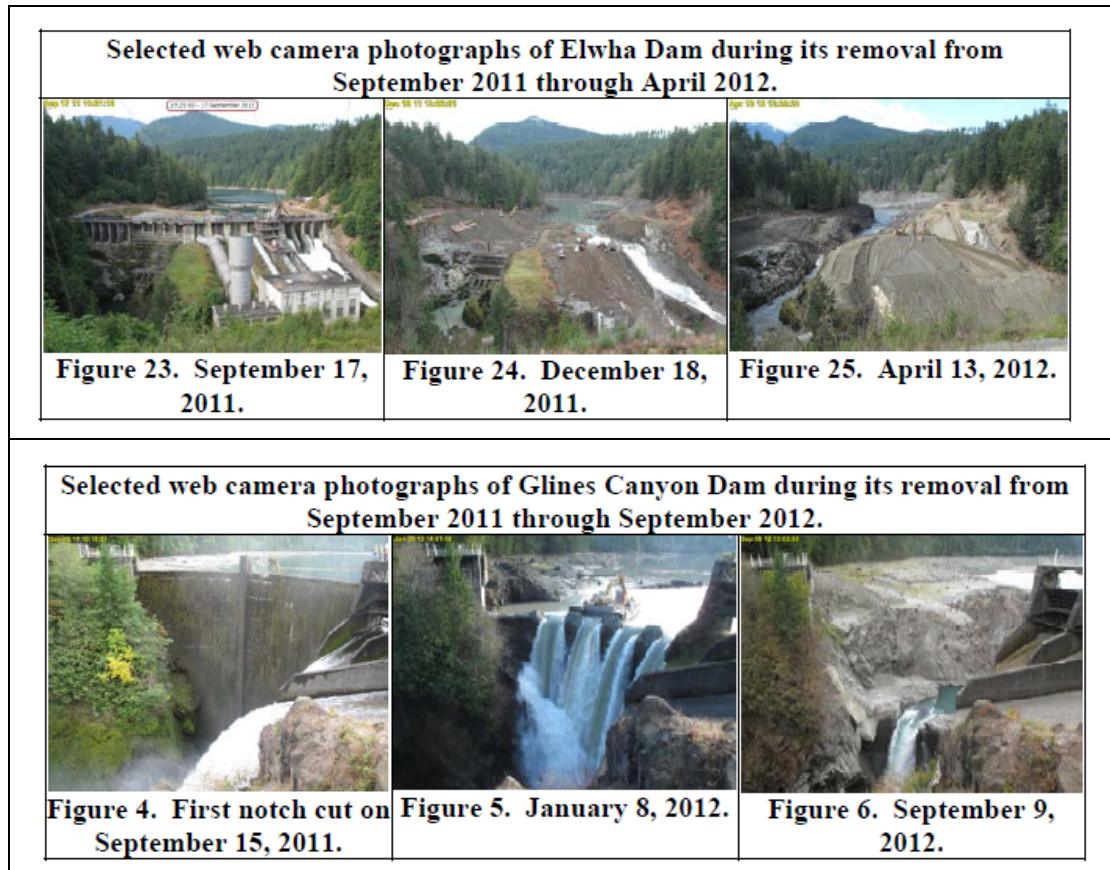


圖 3-6 影像監測 (Randle and Bountry, 2012)

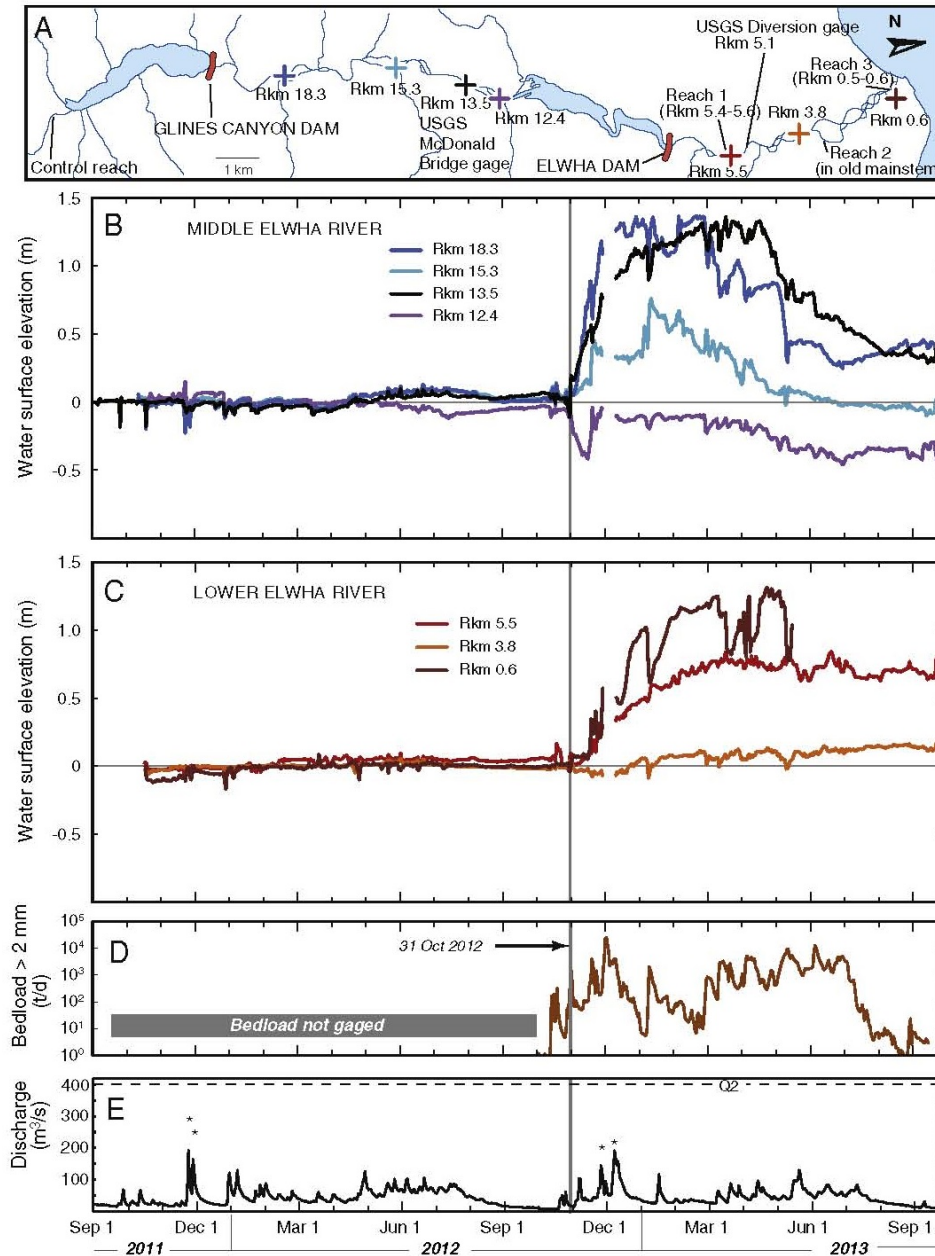


圖 3-7 水文泥砂監測 (East et al., 2014)

除了以上掌握長期監測的兩個壩體改善案例之外，國外亦有些評估監測未竟完全的案例值得借鏡：美國紐約州 Hudson River 上的 Fort Edwards Dam 於 1973 年改善時，工作人員發現下游魚類體內的多氯聯苯(PCBs)濃度開始增加，多年後仍居高不下，乃歸因壩體改善時忽略藏在壩上游土砂中的污染物(Marks, 2007)。相關單位因此緊急掌握各面向的持續監測，時至今日，美國政府仍未開放捕撈條紋鱸魚，就是因為魚體中的多氯聯苯濃度偏高之故；另一案例為美國加州 Clear

Creek 上的 Saeltzer Dam，不若壩體改善前根據約兩年現場調查與數值模擬結果 (Stillwater Science, 1999) 所評估之壩體改善後將僅少量庫區泥砂會被帶往下游並對下游魚類之重要棲地影響不大，壩體於 2000 年秋季改善後之第一年雖未有大型洪水事件(最大洪峰流量約為 35 cms)，僅約 4,500 m<sup>3</sup> 庫區泥砂被帶往下游 (Stillwater Science, 2001)，但在氣候等不確定性下，2001 至 2003 年期間，共發生四場大事件(尖峰流量>80cms)，約 40,000 m<sup>3</sup> 庫區泥砂被帶往下游，因而造成下游重要魚類棲地被覆蓋(Ferry and Miller, 2003; Miller and Vizcaino, 2004)。此兩案例突顯了環境條件變動下壩體改善前後長期監測之重要性。

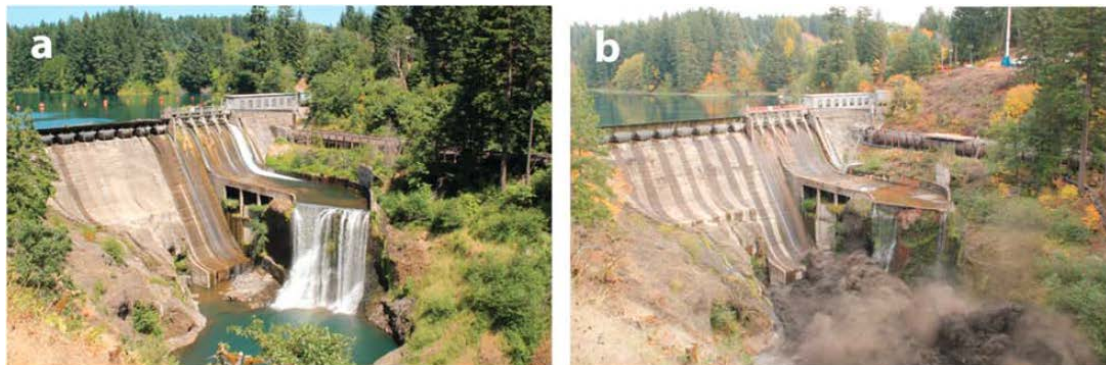
### 3. Condit Dam

Condit Dam 位於美國華盛頓的 White Salmon River，因水力發電需求而興建於 1912-1913 年，集水區面積約 990 km<sup>2</sup>，其壩高 38 m，設計蓄水量為 1.6 Mm<sup>3</sup> (Mead and Hunt et al., 2011)。水庫營運至今，庫區估計近 1.8 Mm<sup>3</sup> 泥砂淤積(Finley Engineering, 2006)，其泥砂組成為 60% 砂土、35% 淤泥和粘土，以及 5% 砂礫(G & G Associates, 2004; Kleinfelder, 2007; Mead and Hunt et al., 2011)，泥砂供應主要來自於喀斯喀特山脈以及亞當斯山的層狀火山的土壤侵蝕量，年平均沖蝕量估計為 0.3 ton/ha-yr (Ambers, 2001; Roering et al., 2010; Czuba et al., 2011b)。

Condit Dam 於 2012 年被要求更新設備的經營許可證(美國聯邦能源監管委員會，2002)，因此相關單位決定在 2011 年以最低成本進行改善工程，其壩體改善方式為在水庫基礎中鑽掘一條寬 24 m 之隧道，以使水庫中的水砂迅速排空，於 2011 年 10 月 26 日進行爆破，潰後迅速造成水庫之水位下降，釋放水量約 160 Mm<sup>3</sup>，並將累積於水庫的泥砂順勢帶往下游，其餘之壩體結構分別在後續幾年內被改善完。

相關單位在潰後持續進行河道地貌之監測工作，其監測結果顯示在潰壩 2 小時內約 10% 泥砂被帶往下游，24 小時內累積約達 20%，期間產生之高濃度含砂水流濃度高達 850,000 mg/L，推移載則於數小時後往下游傳遞，如圖 3-8、3-9。

由上述監測結果顯示，控制潰壩後河道演變過程的條件，包含壩高、潰壩速率、泥砂組成等，其泥砂組成除影響下游流動條件及泥砂傳輸過程外，亦同時影響長期河道演變。



Wilcox et al., 2013)

圖 3-8 Condit Dam (a)壩體改善前(2011/08)；(b)爆破中(2011/10/26)



(從壩頂面向上游拍攝, Wilcox et al., 2013)

圖 3-9 潰壩後上游之時間序列圖

(二) 國內案例

1. 高山溪一至四號防砂壩

自 1999 年起，雪霸國家公園針對防砂壩阻絕造成鮭魚族群洄游的屏障問題，開始著手評估壩體改善之研究。根據現場調查與水工模型試驗結果，並考量臺灣櫻花鉤吻鮭生態習性、當地氣候因素等，高山溪四座攔砂壩於 1999 年 4 月至 2001 年 10 月間陸續被改善。高山溪四座防砂壩與七家灣溪一號壩壩體改善相關資訊如表 3-1 與表 3-2 所示。

為了了解壩體改善對於河道地形變化、棲地組成與鮭魚數量之影響，自壩體改善之後，雪霸國家公園委託相關單位持續進行監測，魚類監測資料顯示，雖然施工期間對於鮭魚棲地產生衝擊，但於壩體改善 3 個月後已恢復以前狀況；且高山溪四號壩於 1999 年 4 月份完成改善後原本生存在三至四號壩河段的鮭魚，有通過四號壩口往上游動的現象。高山溪二至三號壩間河段已逐漸增加之鮭魚數量，顯示上游之族群亦有往下游動現象(王筱雯，2010)。葉昭憲、王永賢(2010)河道地形及棲地監測結果指出，由於壩體改善寬度不足，兩岸樹木由於暴雨及坡面崩塌而進入河道形成殘材壩，再次阻絕魚類洄游路徑，於汛期前先針對殘材予以處理裁切，並期望藉由洪水將殘材帶離壩址，此例突顯長期監測之重要性。

表 3-1 高山溪與七家灣溪防砂壩興建及改善紀錄表 (修改自王筱雯, 2010)

壩名	興建時間	壩高/ 有效壩高 (m)	改善年份 (施工期 20 天)	事項
高山溪 第四號	1978.01.15 ~ 1978.05.16	10/4	1999.04	族群調查發現高山溪鮭魚上溯至破壩上峽谷深潭河段棲息。尤以成鮭為主。(2000.06)
高山溪 第三號	1978.05.16 ~ 1978.06.19	10.5/4.6	2000.10	族群調查發現高山溪仍有一半數量的鮭魚棲息於高山溪上游，且已發現自然更新的幼鮭。
高山溪 第二號	1973.12.16 ~ 1974.07.21	14/6	2001.06	-
高山溪 第一號	1973.12.16 ~ 1974.07.21	14/5.5	2001.06	-
七家灣溪 一號壩	1972.04.21~ 1972.09.11	13/10	2011.06	因為河道窄縮、流速變快的關係，加劇下游兩岸沖刷，因此在一號壩的右側約 30 m 處設有蛇籠保護工程。

表 3-2 高山溪攔砂壩興建及改善紀錄表 (修改自王筱雯, 2010)

壩體 名稱	改善前 廖林彥(2001) 王筱雯(2010)	改善後 廖林彥(2001) 王筱雯(2011)	現況 王筱雯(2010、2017)
高山溪 一號壩			
高山溪 二號壩			
高山溪 三號壩			
高山溪 四號壩			
七家灣 溪一號 壩			

## 2. 巴陵壩案例

### a. 背景資訊

巴陵壩位於大漢溪上游，河川主要源流名為塔克金溪(泰崗溪)，其位置位於新竹縣尖石鄉境內，主要發源於品田山北側標高約 3,100m 處，先向東北流後轉向西北，經司馬庫斯、鎮西堡、新光，在秀巒與薩克亞金溪(白石溪)會合，改稱馬里闊九溪(玉峰溪)，再往北流復轉流，至桃園縣復興鄉下巴陵與另一大支流三光溪會合後，始稱為大漢溪。

巴陵壩約位於榮華壩上游 12 km，於 1977 年完工，為一壩高 38 m 之混凝土重力式攔砂壩，可攔蓄砂量為 1047 萬  $m^3$ ，主要功能為攔蓄上游來砂以減緩下游石門水庫之淤積量並延長水庫壽命(王筱雯，2010)。

### b. 潰壩過程

巴陵壩壩基因被水流淘空，壩基在長期侵蝕下而沖出裂縫，2007 年 9 月 18 日韋帕颱風來襲，時逢狂風暴雨並挾帶大量上游集水區之崩落土石，壩體因無法負荷最終導致潰壩現象產生，損壞面積約達壩體三分之二，其攔沙功能也因而失效，為國內首座崩壞的大型攔砂壩。巴陵壩當初所攔蓄之砂石，潰壩後也被溪水帶往下游，對巴陵壩下游 12 km 處的榮華壩造成影響，巴陵壩潰壩發展如圖 3-10 所示(王筱雯，2010)。

### c. 河相變化

30 年前，巴陵壩的興建改變了大漢溪河床，河床因為壩體攔蓄砂石而升高，隨著潰壩之後，原本被攔阻的砂石開始往下游移動並淤積於下游的河床上，上游河床則遭到沖刷，在河道形成新平衡前須注意河川兩岸邊坡的穩定。根據巴陵壩潰壩前後的地形資料，自 2008 年 1 月至 2008 年 9 月止，巴陵壩上游 5 km 內之估計淨沖刷量約 523 萬  $m^3$  泥砂，而壩下游 5 km 內之淨淤積量估計約 257 萬  $m^3$ ，故約有 266 萬  $m^3$  的泥砂隨河道輸砂逐步帶往下游榮華壩。



林欣怡(2008)採用擬似二維水理輸砂演算模式 NETSTARS 模式(Lee et al., 1996)，針對巴陵壩上下游各 5 km 之研究範圍進行動床輸砂演算模擬，根據模擬結果探討壩體改善後對河床變遷以及魚類棲地之影響，並計算河床穩定性指標 (K)，發現巴陵壩潰壩 2 年後河床可達到穩定平衡，若將壩體分兩次改善，則河床約 4 年可達到穩定平衡狀態，且後者達到平衡之 K 值較大，表示其河床較前者更為穩定(如圖 3-11、圖 3-12 所示)。但二次改善的間隔時間長短並非是造成日後河床演變差異的主要原因，而是改善間隔期間是否有發生颱風事件，故建議在工程實務上，儘量選擇在枯水期時進行壩體分次改善作業。

THIWE(2009)初步發現，改善橫向水工結構物後，表層細砂會被移開，原本的粗砂或上游夾帶而下的粗砂會留在此而形成粗化現象；細顆粒往下游移動過程，會造成下游河床細砂填縫現象 (fine sediment infiltration)，但長時間之後細砂填縫會消失，可利用愛因斯坦細砂淤積公式推算塞縫的沿程細砂淤積。而橫向水工結構物頂坡段坡度為原河床坡度的  $1/2-2/3$ ，所以改善後的坡度會回復為原坡度 (約為頂坡段坡度的 1.5-2 倍)。



2002 October



2005 September



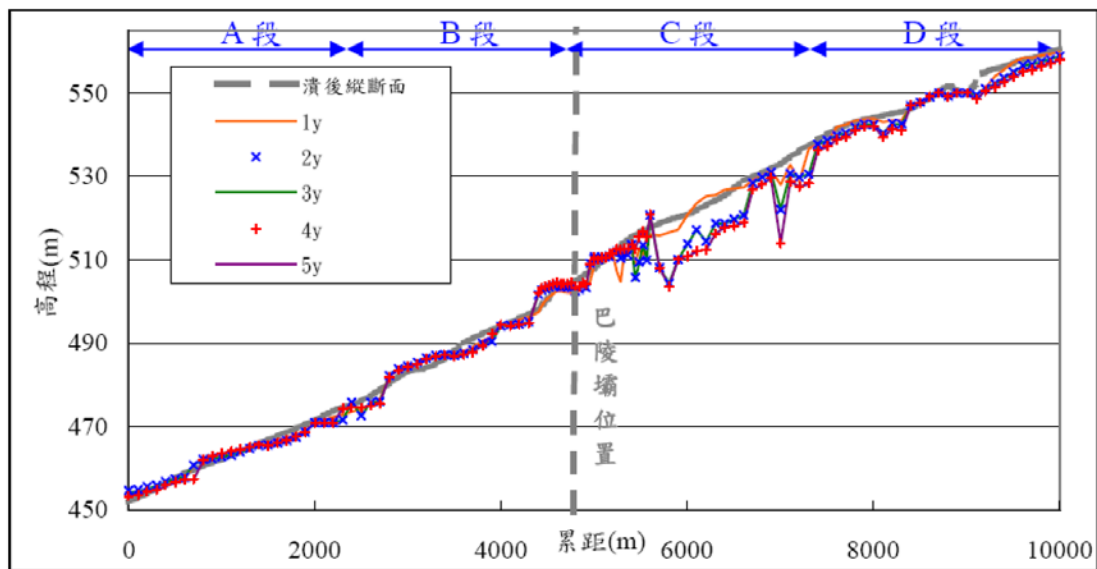
2006 August



2007 November

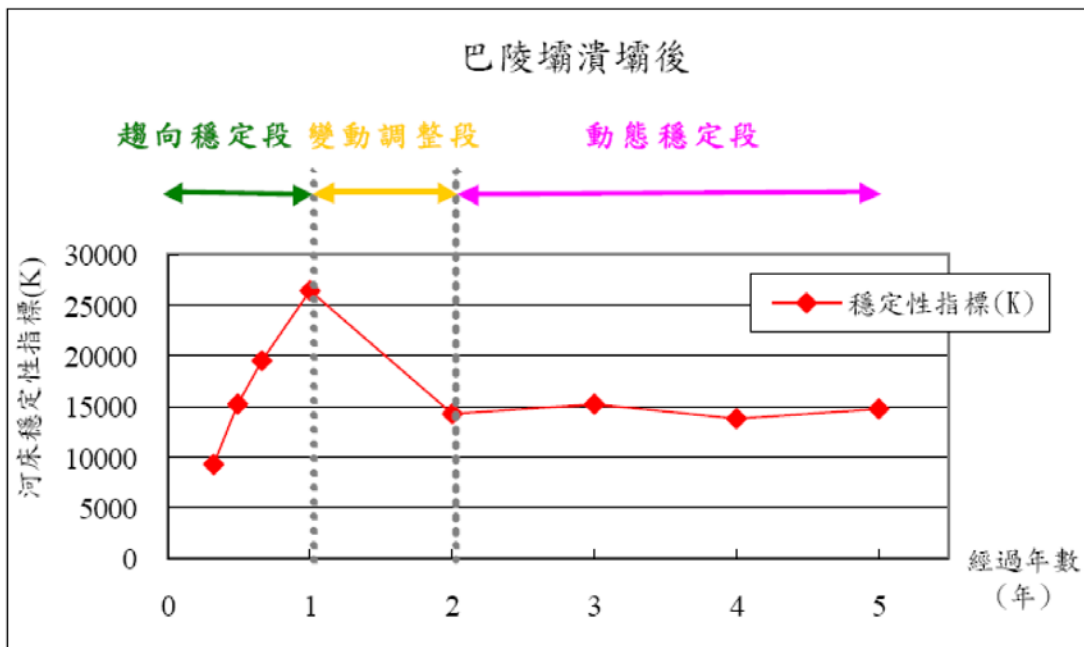
(水利署北區水資源局提供)

圖 3-10 巴陵壩現場照



(林欣怡，2008)

圖 3-11 模擬巴陵壩潰壩後-河床縱斷面模擬結果



(林欣怡，2008)

圖 3-12 巴陵壩潰壩後-穩定性指標(K)與經過年數之關係圖

Tullos and Wang (2014)藉由現地調查記錄探討(a)潰壩後，輸砂率在不同時期的變化與河道調整關係；(b)潰壩前後，流域土砂與水文事件對輸砂率的影響。結果說明，河道改變速率與形式受到流域水文事件、泥砂條件、河谷地形配置及與壩之距離所影響，其影響隨著時間及與壩之距離增加而減少。

### 3.3 壩體改善與河道環境相關研究

在河相演變方面，Pizzuto (2002)提出在壩體改善後的數個月內，經由河川劇烈的沖刷因而導致壩體上游區域的左右河岸坍塌，原始淤積之泥砂輸送至下游，隨著沖淤變化的演變，經過數月至數十年的時間後，河床形成新的平衡狀態。圖 3-10 為一簡化表示壩體改善後歷經時間變化與各段的河相變化，明確指出壩體改善後河相演變的時間尺度為至少十年，突顯了水文與泥砂長期監測之重要性。壩體改善造成河相的變化莫過於壩上游淤積的泥砂的運移情形，泥砂在將以不同的方式和過程逐漸往下游傳遞，其中淤積泥砂的厚度及河床底質粒徑組成，對於壩體改善後河相的變化探討佔有很重要的影響力，而其中關鍵的影響因素即為壩高，如同圖 3-11 所示，當淤積泥砂的組成為細粒料泥砂時，溯源侵蝕為主要的侵蝕機制，在低流量的狀態即可以造成細粒料泥砂的沖刷，相反的粗顆粒在低流量的條件下不易被啟動，造成護甲現象的產生，也導致河床上坡度的不連續，形成一連串的跌水現象，若粒徑組成為偏大的礫石，則需有較大的洪水事件，才能造成顆粒的運移(王筱雯等人，2013)。

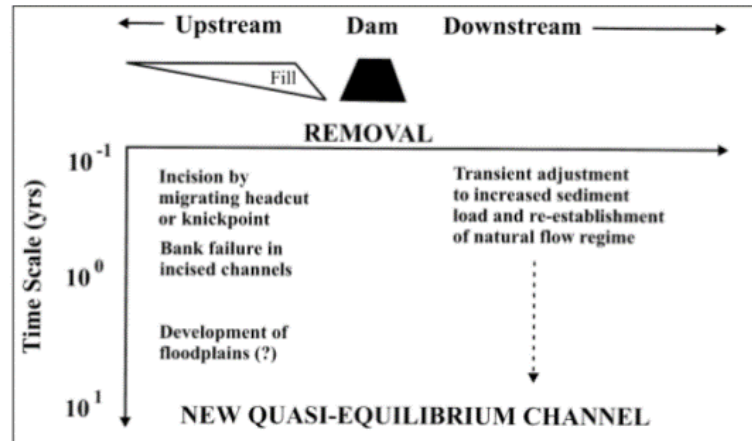


圖 3-13 壩體改善後河相演變時間示意圖 (Pizzuto, 2002)

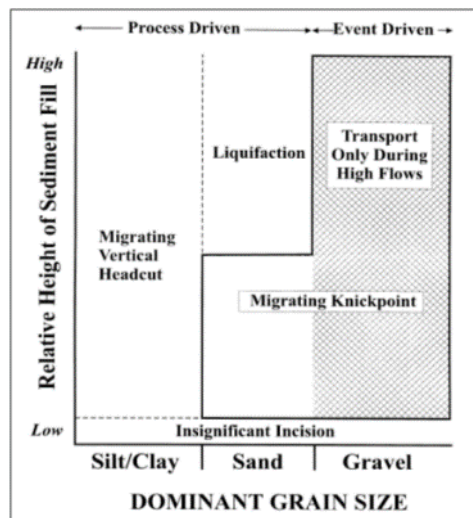


圖 3-14 不同泥砂淤積高度與組成運移關係圖 (Pizzuto, 2002)

為了解壩體改善後河道演變的過程與影響機制、及各階段變化的時間尺度，國外雖已有些壩體改善與河相觀點的河道演變模式已被發展與應用 (Pizzuto, 2002; Doyle et al., 2002, 2003; Evans, 2007)，但對於較高泥砂產量、陡坡之山區溪流河道演變之探討仍有限。王筱雯等人(2013)藉由七家灣溪一號壩壩體改善前後水文、地形與影像監測紀錄，依據七家灣溪一號壩上游 48 m 處及下游 30 m 處斷面變化，修正 Doyle et al. (2002)與 Evans (2007)所提出之河道演變模式，分別定義上下游九個與六個河道演變階段，如圖 3-12。其中，上游階段 B'、階段 E1、

E2、E3 與過去 Doyle et al.(2003)與 Evans (2007)所提概念有所不同，其原因乃在於壩體規模、河道岩盤、水文事件之時間點、河道泥砂粒徑組成、與河道坡度等因子之差異。據其研究，七家灣溪至今河相尚未達準平衡階段，持續觀察七家灣溪之後續演變與達到準平衡階段之過程有其必要性。

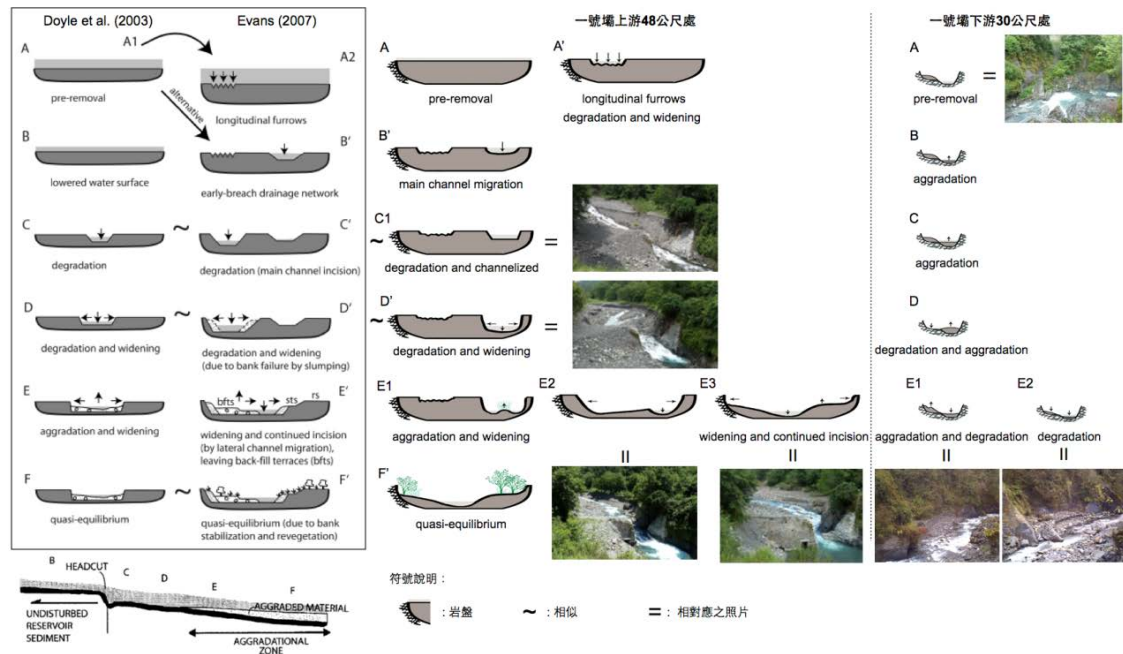


圖 3-15 七家灣溪河道演變模式 (王筱雯等人, 2013; Doyle et al., 2003; Evans, 2007)

本案主持人王筱雯副教授受美國生態學會年會(Ecological Society of America, ESA)主辦單位之一 American Rivers 與 US Geological Survey (USGS)的邀請，於 2017 年 8 月 6 日至 8 月 11 日期間至美國波特蘭參加研討會，並於「Dam Removal: A Synthesis of Existing Science and its Implications for the Practice」場次中發表「Is Dam Removal a wellaccepted practice in Taiwan?」(表 3-3)，希望藉由此場次的互動討論，以 USGS Powell Center 中以學界、私人機構、與政府單位所共同組成的壩體改善科學工作小組(Dam Removal Science Working Group)之相關研究成果為基礎，對於美國與其他區域在近年來相關科研成果與決策過程中所得到的經驗進行剖析與對於未來相關案例的建議。與會發表者從河相、生態、監測、管理、政

策形成等不同角度切入，是一個環繞壩體改善主軸的跨領域討論。而本案主持人的發表，係為整個場次中唯一一個美洲以外的案例，特別點出在高山陡坡溪流、泥砂產量高、水文變異性大的環境特性下，以雪霸國家公園境內的七家灣溪一號防砂壩之壩體改善經驗，與壩體改善後本團隊所進行至今為期七年的研究成果與觀察，是如何兼顧櫻花鉤吻鮭的生態復育、壩體安全與河道變遷考量的決策與實務操作進行分享，並點出此與美國相對穩定之溪流環境下的思維，大相逕庭。

表 3-3 Dam Removal: A Synthesis of Existing Science and Its Implications for the Practice 場次論文列表

篇名	作者資訊
Status and trends of dam removal research in the United States	J. Ryan Bellmore, U.S. Forest Service; Jeffrey Duda, US Geological Survey Biological Resource Division; Laura Craig, American Rivers; Daniel Wieferich, US Geological Survey; Samantha L. Greene, US Geological Survey; Mathias Collins, National Marine Fisheries Service; Christian E. Torgersen, U.S. Geological Survey; Kaherine Vittum, US Geological Survey
Geomorphic consequences of dam removal	Jim O'Connor, U.S. Geological Survey; Jon Major, U.S. Geological Survey; Amy East, U.S. Geological Survey; Gordon E. Grant, US Department of Agriculture Forest Service; Andrew Wilcox, University of Montana; Mathias Collins, National Marine Fisheries Service; Francis J Magilligan, Dartmouth College; Chris Magirl, U.S. Geological Survey; Desiree Tullos, Oregon State University; Jennifer Bountry, US Bureau of Reclamation; Timothy J. Randle, U.S. Bureau of Reclamation
Ecosystem response to dam removal: A synthesis	George Pess, National Oceanic and Atmospheric Administration; J. Ryan Bellmore, US Geological Survey; Jeffrey Duda, US Geological Survey Biological Resource Division; James O'Connor, U.S. Geological Survey; Amy East, U.S. Geological Survey; Melissa M. Foley, University of California Santa Cruz; Andrew Wilcox, University of Montana; Jon Major, U.S. Geological Survey; Patrick B. Shafroth, US Geological Survey; Chris Magirl, U.S.

	Geological Survey; Chauncey W. Anderson, US Geological Survey; James Evans, Bowling Green State University; Christian E. Torgersen, U.S. Geological Survey
Landscape context and the biophysical response of rivers to dam removal in the United States	Melissa M. Foley, University of California Santa Cruz; Francis J. Magilligan, Dartmouth College; Christian E. Torgersen, U.S. Geological Survey; Jon J. Major, U.S. Geological Survey; Chauncey W. Anderson, US Geological Survey; Patrick J. Connolly, US Geological Survey; Daniel J. Wiefelich, US Geological Survey; Patrick B. Shafroth, US Geological Survey; James E. Evans, Bowling Green State University; Dana M. Infante, Michigan State University; Laura S. Craig, American Rivers
Barrier removal prioritization tools to inform watershed and regional-scale restoration strategies	Tara Moberg, The Nature Conservancy; Erik Martin, The Nature Conservancy; Jessica Levine, The Nature Conservancy
Designing for the predictable geomorphic response in an unpredictable regulatory environment	Paul Woodworth, Princeton Hydro; Laura Wildman, Princeton Hydro
Synthesis of common management concerns associated with dam removal	Desiree Tullos, Oregon State University; Mathias Collins, National Marine Fisheries Service; J. Ryan Bellmore, US Geological Survey; Jennifer Bountry, US Bureau of Reclamation; Patrick V. Connolly, US Geological Survey; Patrick B. Shafroth, US Geological Survey; Andrew Wilcox, University of Montana
Dam removal in Canada: Similar challenges at every scale	R. Allen Curry, University of New Brunswick; Gordon Yamazaki, University of New Brunswick; Tommi Linnansaari, University of New Brunswick; Wendy A. Monk, University of New Brunswick
<b>Is dam removal a well-accepted practice in Taiwan</b>	<b>Hsiao-Wen Wang, National Cheng Kung University</b>
The future of dam removal	Serena McClain, American Rivers

本計畫為了解近年來美國與其他區域壩體改善議題之相關經驗與成果，於表

3-3 中選取已發表之期刊論文或文章進行文獻回顧與剖析，以供國內做借鏡：

1. Status and trends of dam removal research in the US

為了探索美國壩體改善研究的現狀、趨勢和特點，Bellmore 等人(2017)收集與分析壩體改善案例後指出，儘管美國有超過 1200 多座水壩已經被改善，但只有不到 10% 的案例進行科學評估(圖 3-16)，大多數研究只在短時間(<4 年)或有限時間(1-2 年)中進行，或者沒有壩體改善前的監測，並且大多數研究著重於水文和河相演變，僅有少數針對物理性與生態之間連結的研究被發表。為了評估壩體改善後的影響與決策所需的科學依據，一個長期、跨領域案例研究與完善的研究設計是必需的。

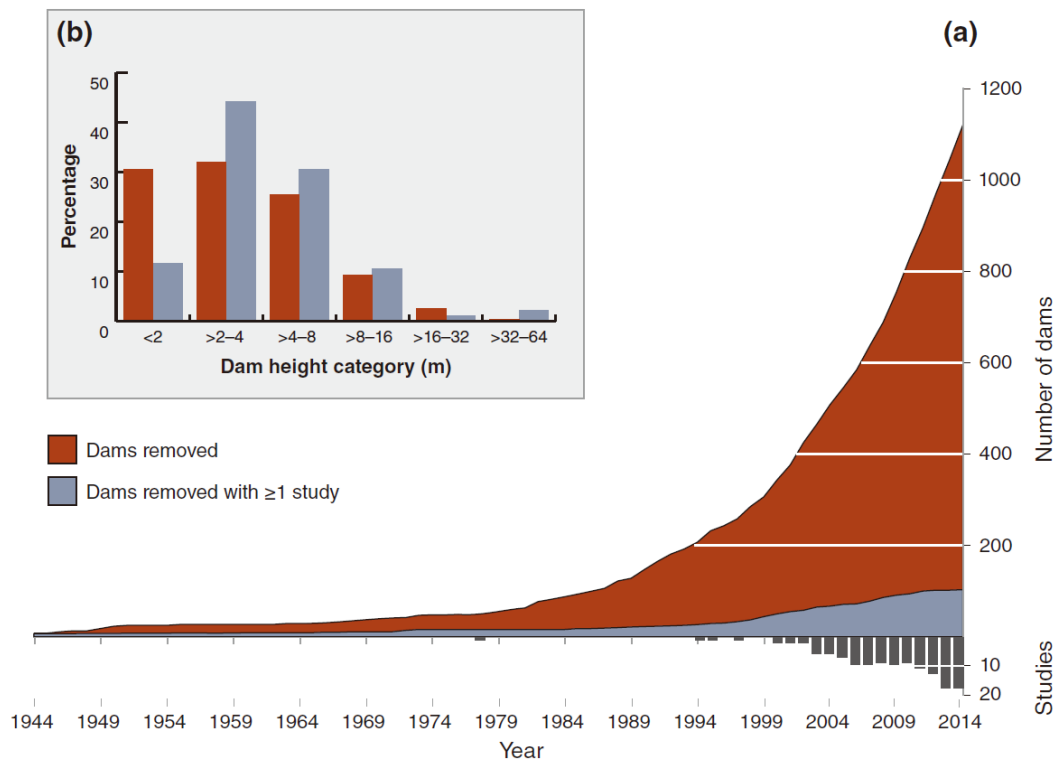


圖 3-16 壩體改善與研究發表：(a)累積壩體改善數量與每年研究發表數量；(b)

改善壩體之壩高與研究發表數量相對百分比



## 2. Landscape context and the biophysical response of rivers to dam removal in the United States

自 1970 年代以來，美國有超過 1,100 座大壩被改善。然而，這些壩體改善案例中，只有 130 個案例進行生態或河相評估，其中涵蓋壩體改善前與壩體改善後(Before and After Removal, BAR)的研究佔不到一半。Foley 等人(2017)應用整合分析比較現存壩體和已改善壩體的景觀環境，評估了 63 個 BAR 研究的壩體改善後的生物物理反應，發現美國壩體改善案例在東北部和中西部的北部、三級和四級河川、低海拔(<500 m)和低坡(<5%)的小至中流域上游流域地區(10±1000 km<sup>2</sup>)有較高的密度，這些區域具有棲息地退化風險較低的特徵，而許多 BAR 的壩體改善研究也具有這些特徵，說明了美國對大壩改善影響的理解僅侷限在相似的環境背景條件(landscape setting)，因此對於其他環境背景條件下壩體改善影響的預測能力是有限的。不同的環境條件可能影響壩體改善對生物物理的反應，然而，生物物理資料中的變動量或群聚並非均勻分布，因此難以確定哪些環境條件下壩體改善對生物物理影響最大。該研究為了解決壩體改善研究間資料不一致的問題，提出了壩體改善的調查優先順序和標準化的建議：

1. 在壩體改善前後於不同時間與空間尺度上的採樣，對於指標取樣和預期變化的幅度而言是有意義的。
2. 壩體改善後，若僅調查下游的反應，並不能全面審視生物物理的反應，因此調查範圍需要涵蓋欲改善壩體之上游、庫區及下游區域。
3. 應盡可能的調查所有的環境指標以比較壩體改善前後差異，若有困難，則優先考慮影響指標物種的已知變因。
4. 可利用技術與公民科學(Citizen Science，指公眾參與的科學研究)來延長採樣或監測工作的時間，如可應用衛星影像評估地貌與植生的變遷，以及招募公民科學家拍攝空間上對齊的重複照片(如同雪霸國家公園七家

灣溪一號壩的影像監測)、測量河流水溫，或在固定區域記錄其他環境因子。

5. 編譯及保存已公開之資料，並加入至公用資料庫，包含由美國 USGS 管理之壩體改善資訊入口(<https://www.sciencebase.gov/drip/>)。七家灣溪一號壩與高山溪四座壩之壩體改善基本資料亦收錄於該系統中，如圖 3-17。

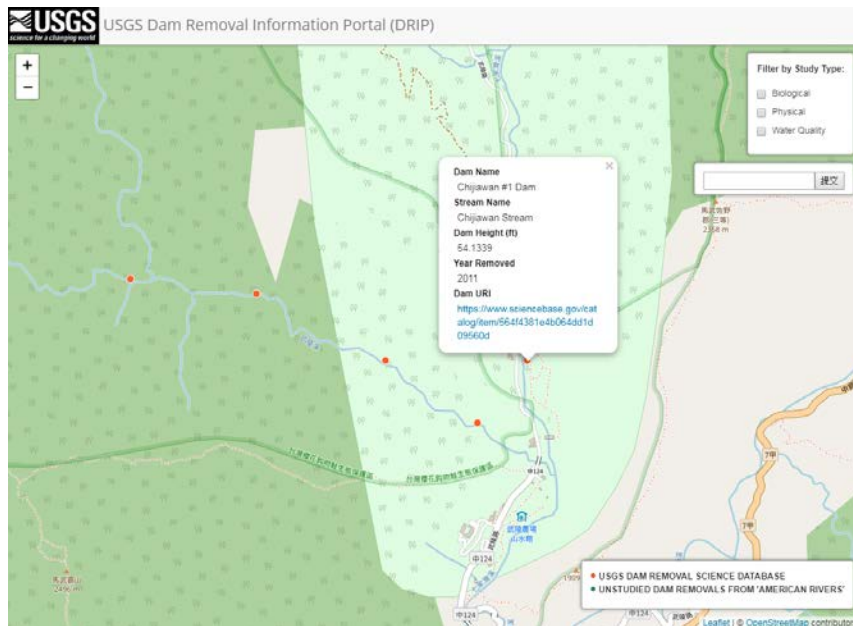


圖 3-17 壩體改善資訊入口-七家灣溪與高山溪案例

### 3. Synthesis of common management concerns associated with dam removal

Tullos 等人(2016)藉由壩體改善科學資料庫探索到七個常見的管理問題(Common Management Concerns, CMC)，並調查這些問題的發生和生物與非生物因子(Biophysical controls)間的影響。七個常見的管理問題如：水庫泥砂沖刷程度和速度、水庫上游河道過度下切、下游泥砂淤積、下游濁度升高、對當地水利設施的取水影響、外來種植物的入侵，以及侵入魚類的擴張等。為完整評估管理問題的風險，管理者應該同時評估現場條件，並判定生物與非生物現象所造成的問題是否將會對生態系統或人類的使用造成負面的影響。該研究顯示管理問題有一個或多個共同的生物和非生物影響因子，有助於判斷環境的多重風險，並且證明評估管理問題的風險應該同時考慮其他因子，如自然流域變異性和演變歷史。

### 3-4 小結

壩體改善近年來常被作河溪復育的手段之一，越來越多的壩體被改善，其中不乏有超過 10 m 的大壩(圖 3-17)，然而，截至目前的壩體改善科學是相對考慮不周。Foley 等人(2017)根據過去的壩體改善研究案例總結壩體改善後的河道反應，同時指出目前理解中的知識差距、偏見與局限性，如下：

#### 1. 庫區泥砂的運移(Sediment can move)

庫區泥砂的特性以及壩體改善時程影響著庫區泥砂的運移行為(Sawaske and Freyberg, 2012; Grant and Lewis, 2015; Major et al., 2017)，如圖 3-18。泥沙粒徑對於庫區及其下游的河道影響很大，若是砂與礫石，可迅速地由水庫運移到下游(Burroughs et al., 2009; Major et al., 2012; Tullos et al., 2014; Harris and Evans, 2014; Tullos and Wang, 2014; Major et al., 2017)，而黏性泥沙與黏土的侵蝕速率較慢(圖 3-18)。例如，Wisconsin 州 Koshkonong River 上的 Rockdale Dam (3.3 m)在改善 11 年後，庫區內只有 11%的細粒料泥砂被帶往下游(Doyle et al., 2003)，與庫區的泥沙已固結且具非黏性的特性有關(Wang and Kuo, 2016)，而 Marmot Dam (15 m)庫區內的粗粒料泥砂有 17%在壩體改善後前 60 小時被侵蝕(圖 3-18)(Major et al., 2012)。階段性的壩體改善可能可以減少濁度對於魚類的影響，包含含沙濃度與持續時間，也可控制庫區泥砂的侵蝕速率。

#### 2. 族群改變(Species can change)

雖然泥砂的動態是壩體改善主要關注的議題，但物種與生態系統的回復往往是壩體改善長期的目標。如同壩體改善後泥砂的反應，生態反應在上下游之間同樣具有高度的關聯性，流域的環境條件與生物族群空間分佈強烈影響著生態反應。壩體改善並不會直接擾動到庫區的生態系統，但在生物棲地廊道的連續性回復後，移動性的生物(如魚、蝦)可進入壩體改善前無法進入的棲息地，生物族群的空間分佈改變(Pess et al., 2014)。由於生態系統的恢復時間超過到至今大多數壩體改善研究的時間，因此我們對於長期生態回復趨勢的理解仍然有限。長期監測各種

規模的大壩，尤其是釋放大量泥砂的壩體改善案例，將會增進我們對環境有所擾動時如何恢復生態系統的知識。

### 3. 壩的尺度對河道的影響(Size matters)

壩高、水庫尺寸、庫區後泥砂量與泥砂粒徑為影響壩體改善後河道侵蝕量與形式的重要因子。大多數被改善的壩(94%)其壩高未達 10 m (圖 3-17)且庫區泥砂少於 10,000 m<sup>3</sup> (Major et al., 2017)，而改善這些小壩(<10 m)對河相與生態造成的影響相對輕微(如 Skalak et al., 2011; Sawaske and Freyberg, 2012; Tullos et al., 2014)，相較之下，改善大壩(>10 m)後的物理效應更為重要但僅有少數研究進行(Allen et al., 2016; Major et al., 2017)。大壩所攔蓄的泥砂量多於小壩，且壩體改善後對下游有較長時間的影響(Podolak and Wilcock, 2013; East et al., 2015)，但這僅是目前的結論，因為沒有一座大壩改善後持續監測超過 10 年(Bellmore et al., 2017)。以七家灣溪一號壩為例，至 2011 年改善至今已監測長達 7 年。

### 4. 壩體改善與地理位置的影響 (Location is important)

改善流域內的系列防砂壩，可回復流域高比例的河流連續性，特別是改善河系中最下游的壩。相反的，若是僅改善系列防砂壩其中的一座，對回復河流連續性的效益不大(Cooper, 2013)。由於美國地理環境背景條件變化不大，因此在類似環境背景條件下壩體改善對環境影響可預測性高而具優勢，但也限制了了解其他地理環境背景條件下壩體改善影響的機會，例如七家灣溪一號壩位於臺灣中部的高山溪流，具有一個有季節水文特性強、高流量、高砂量及中等至陡的河道坡度，與美國地理環境大相逕庭。

### 5. 特別事件的發生(Surprises happen)

在少數壩體改善案例中有未預期的事件發生，雖然沒有造成大災難，但也提醒了我們，所有的大壩改善都有不同的起始條件，並受到物理過程、生態反應、河段與集水區演變歷史之間複雜的交互作用。庫區泥砂的侵蝕的發生可能比預期更為快速與影響範圍更遠，這些壩體改善影響的規模與形式並非可從過去經驗中

可看到。庫區的泥砂可能含有有毒物質，累積的泥砂若釋放至下游將對下游居民造成影響(Wildman and MacBroom, 2005)，例如 1973 年改善 Hudson River 上 Fort Edward Dam 庫區釋放的泥砂受到多氯聯苯的(Shuman, 1995)。由於許多壩興建於數十年或數百年前，對於建壩前的原始地形或壩後攔蓄的泥砂組成所知有限，目前於壩體改善前普遍評估潛在的污染物(如 DDT、重金屬、毒素、放射性物質等)，若要改善含有污染物的壩，可以藉由工程手段來防止或限制受污染的泥砂被釋放到下游(e.g., Stanley and Doyle, 2003; Evans and Wilcox, 2014; Evans, 2015)。

#### 6. 壩體改善後的河道反應快速，但河道與生態的回復趨勢各不相同

##### (Response is rapid, but recovery trajectories vary)

在大多數的壩體改善案例中，庫區後的泥砂會被快速的帶往下游，並有回復至建壩前的坡度與河相的趨勢，河流系統的強烈的上下游耦合造成快速的物理反應，河道大多於幾年內穩定，而非十年以上，且通常較數值模式所預測的回復時間來得快(Major et al., 2012; Costigan et al., 2014; Tullos et al., 2014; Major et al., 2017)。壩體改善後，水生生物也能快速建立新族群或是連結棲地，特別是若能在壩體改善一開始的泥砂衝擊中存活下來(Sethi et al., 2004; Pess et al., 2014; Tullos et al., 2014)。儘管個體生物可以相對快速的進入新的棲息地並重新生活，但是整個族群回復的速度不盡相同，取決於族群數量增長速度、個體在族群中的移動能力(Doyle et al., 2005)、食物與棲地的質量等(Bukaveckas and Wood, 2014)。生物轉換率高的生物(如藻類、無脊椎動物)，可以在幾天到數周內將族群數量翻倍，一旦渡過一開始的泥砂衝擊後，即可迅速回復(Stanley et al., 2002; Bushaw-Newton et al., 2002)；對於兩棲動物、魚類、淡水貝類等生長繁殖緩慢的生物而言，可能需要數月甚至數年的時間族群才能回復(Poulos et al., 2014)；成熟的濱岸植物則需要數十年甚至更長的時間(Orrand Stanley, 2006)。

**7. 回復至建壩前的狀況或許是不可能的(Pre-dammed conditions may not be possible)**

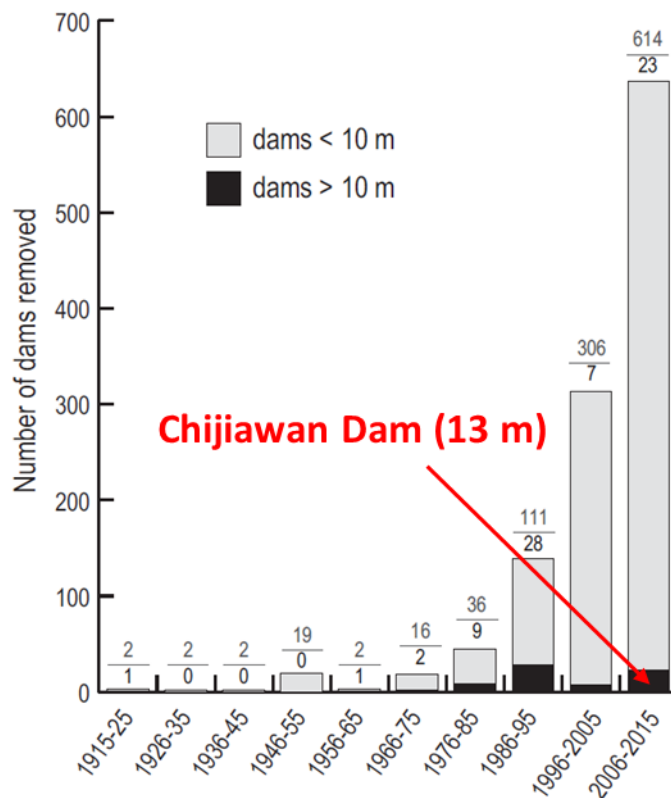
藉由壩體改善來達到河溪復育的概念，隱含著一旦壩體改善，河流將回復到建壩前的狀況。然而，實際上並非如此，因為區域或流域尺度的土地利用、水質、氣候的變化會影響物理與生態回復的趨勢(圖 3-19)，以及壩體改善後最終的演變結果(Palmer et al., 2010; Feld et al., 2011; Webb-Sullivan and Evans, 2014; Magilligan et al., 2016; Warren et al., 2016)。

**8. 河道預測模式有用，但非所有案例皆適用(Predictive models are useful but not widely available)**

由於壩體改善議題受到許多關注，促使數值模式的發展，數值模式可以幫助管理者預測壩體改善後的影響(如 Rathbun et al., 2005; Downs et al., 2009; Cui et al., 2017)，儘管這些模式在泥砂管理計畫與減緩設計是有用的，但還有改進的空間。量化的模式主要專注在預測壩體改善後的泥砂侵蝕、傳輸與淤積行為(Cui et al., 2006a,b; Cui and Wilcox, 2008; Konrad 2009; Gartner et al., 2015)，包含庫區縱斷面的演變與下游整體淤積情形(Cui et al., 2014)。在某些情況下，模式很難預測壩體改善後懸浮泥砂濃度的尖峰值、庫區侵蝕細節或下游特定區域的淤積量(Cui et al., 2014)。大多數的輸砂數值模式不能預測到溯源侵蝕終點的遷移與其所伴隨的快速侵蝕速率，並且側向侵蝕過程也未被考慮(Cantelli et al., 2007)。大多數的數值模式的泥砂傳輸模擬，都是基於由水槽試驗、現地資料或物理理論等來推演的輸砂公式，各個輸砂公式皆有其限制(如坡度、泥砂粒徑大小等)，而在這些限制下，找不到一個符合臺灣高山溪流(如七家灣溪)環境的輸砂公式，因此儘管數值模式被廣泛應用於美國的壩體改善案例，並且有不錯的表現，但是在地理環境條件與美國迥異的臺灣而言，數值模式的適用性有其不確定性。

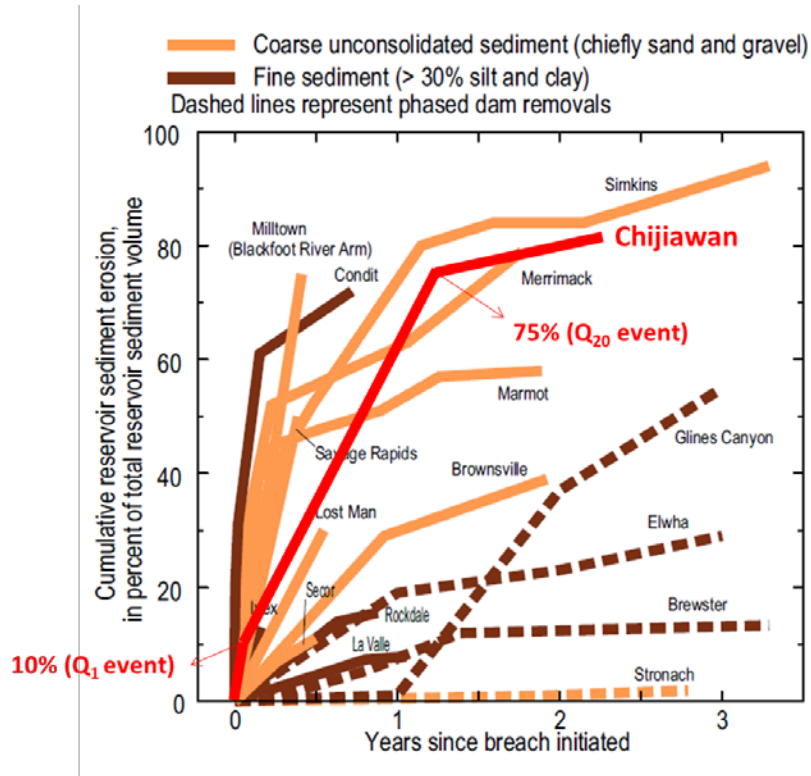
### 9. 持續聆聽河流告訴我們的事(Keep listening)

目前進行中或未來將改善的壩，採樣資料將有利於說明與瞭解生態系統在不同時間尺度下的反應。到目前為止，大多數已發表的研究主要在探討壩體改善對於一至兩個特定因子的影響，如泥砂的釋放或特定物種的改變。然而，瞭解壩體改善對於整個生態系統的影響，需要綜合分析物理、水質與生物的反應，這樣的研究有其必要性並有利於理解物理與生物影響的交互機制，但實際上僅有少數研究落實(Hart et al. 2002; Bellmore et al. 2017a; Foley et al., 2017b)。反過來說，全面性的研究可以為所有大壩改善研究中制定標準化指標，進一步提高我們分析壩體改善影響的能力。



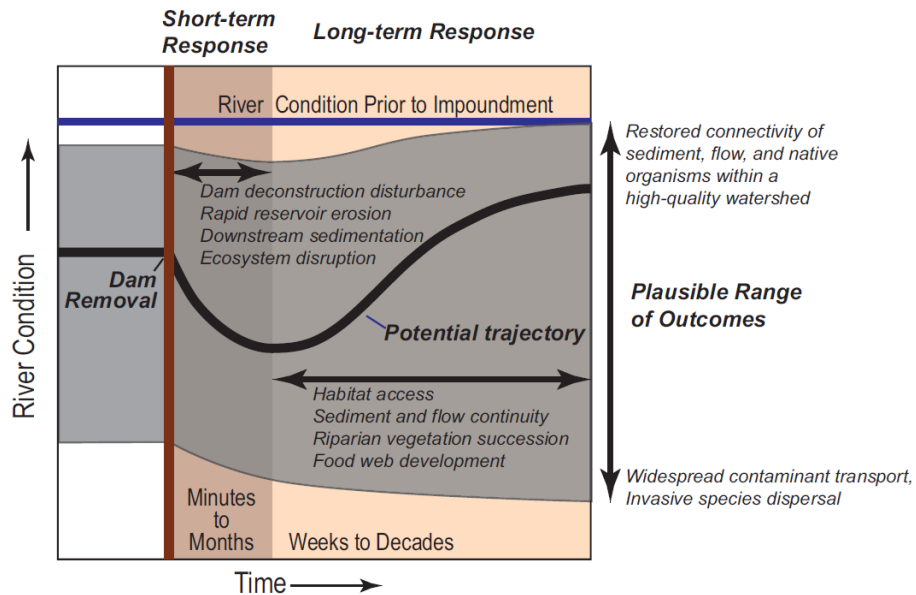
(Foley 等人，2017)

圖 3-18 各年代壩高小於 10 m 及大於 10 m 之壩體改善數量



From Sawaske and Freyburg, 2012; Grant and Lewis, 2015; Major et al., 2017 ;  
 本團隊修改

圖 3-19 不同泥砂組成與侵蝕土方量之關係



(Foley 等人, 2017)

圖 3-20 壩體改善後河流反應概念



### 3.4 問題初探

水位記錄為七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之監測指標中洪災預警重要指標之一，而流量、濁度亦為保護區經營管理各生物監測的重要環境因子(王筱雯，2016)。本團隊於 2011 年 5 月 24 日於觀魚臺及萬壽橋架設泥砂測站，兩站之監測儀器已於蘇拉颱風期間(2012 年 7 月 30 日至 2012 年 8 月 3 日)沖毀流失(王筱雯，2012)；萬壽橋水位測站於 2011 年 5 月 24 日架設雷達波水位計並開始記錄，然因機器老舊與雨水滲入儀器導致損壞，因此水位資料僅記錄至 2015 年 8 月 15 日(王筱雯，2015)。為延續七家灣溪水文泥砂之監測，雪霸國家公園管理處於 2017 年 1 月 16 日完成水文泥砂測站架設，包含萬壽橋(水文監測-水位、流速；泥砂監測-濁度)、一號壩(泥砂監測-濁度)以及觀魚臺(泥砂監測-濁度)三測站。

七家灣溪河道在不同強度水文事件下之環境變動性與複雜性高，尤其壩體改善後，因此持續針對河道環境現況了解有其必要。參考王筱雯(2015)所提出之七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷指標，本計畫將進行保全區域例行性監測，包含一號壩上游 50 至 200 m 之左岸側向侵蝕情形以及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之淹水潛勢，亦進行溯源侵蝕、崩塌地等調查，以進一步評估保全措施。

## 第四章 研究地區

### 4.1 地文資料

#### 1. 流域背景資料

本計畫之研究範圍，係位於臺灣中部地區之武陵農場，武陵地區海拔約 1,740~2,100 m，是一個由雪山山脈所圍繞而成的葫蘆形狹長谷地。

區域中主要溪流為七家灣溪，與有勝溪、司界蘭溪等匯集後即成為大甲溪上游，屬於德基水庫集水區。七家灣河流域面積約為 72 km<sup>2</sup>，總長約 15.3 km，為大甲溪上游的主要發源地，發源於桃山(3,325 m)、池有山(3,301 m)、品田山(3,524 m)、雪山北峰(3,702 m)和雪山(又稱興隆山，海拔 3,886 m)之南側面，各發源地高程皆超過 3,000 m。西北側的品田溪與池有溪匯入桃山西溪(又稱無名溪)，於武陵吊橋附近與北來的桃山北溪匯集成七家灣溪主流；在武陵農場本部附近，有西側的雪山溪(又稱高山溪)匯入七家灣溪本流，在武陵國民賓館附近萬壽橋和迎賓橋間，與有勝溪匯流形成大甲溪主流。

七家灣溪平均河寬介於 30 至 150 m 之間、流域平均高程介於 1,650 至 3,000 m(圖 4-2)；受到各山脈環繞，其流域境內坡度大部份為 55% 以上(圖 4-3)；本區地質由始新世四稜砂岩層和漸新世水長流層及中新世廬山層所構成(圖 4-4)，七家灣溪沿岸之區域多屬侵蝕性河階，表層沖積層既淺且薄，可見裸露出之板岩岩盤。武陵農場靠山地帶屬砂岩地質，平緩地帶 2~4 m 以上的面層屬礫石、塊岩層，下方為灰、棕黃色的砂岩互層。七家灣河流域坡向分布十分平均(葉昭憲，2007、2008；王筱雯，2010)。

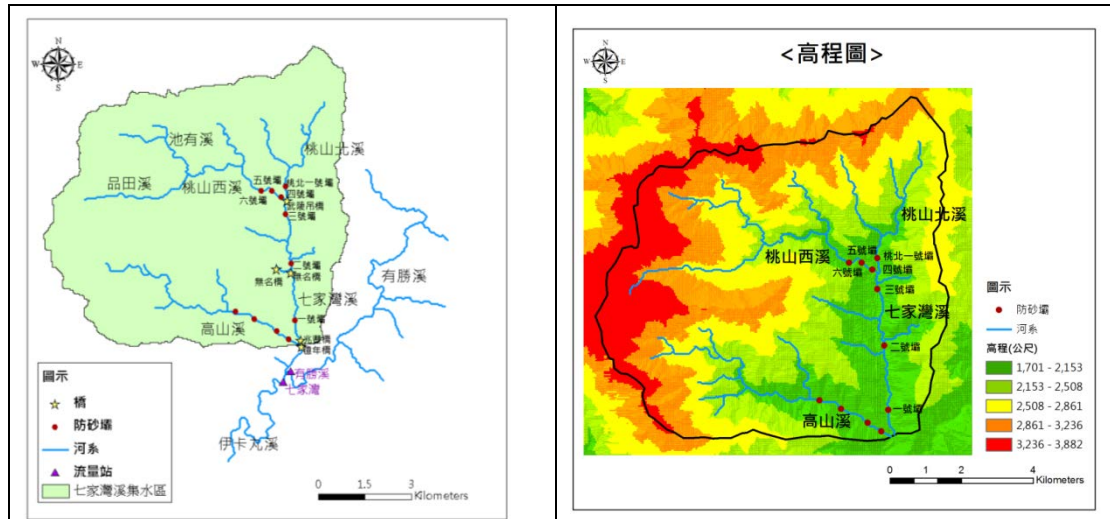


圖 4-1 七家灣溪集水區

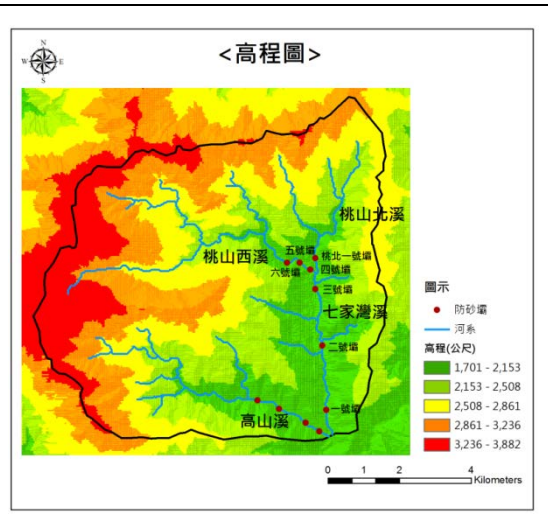


圖 4-2 七家灣河流域高程圖

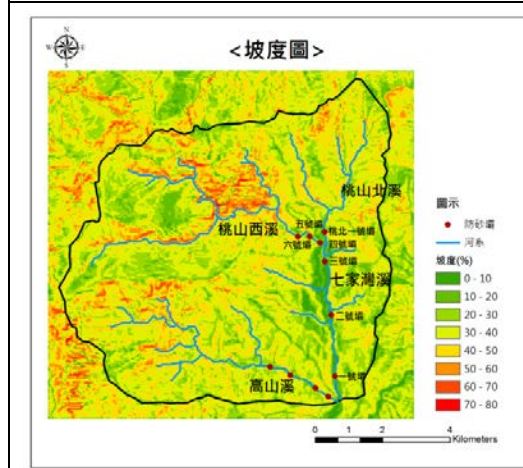


圖 4-3 七家灣河流域坡度圖



圖 4-4 七家灣河流域地質圖

資料來源: 王筱雯, 2010

在土地利用方面，為配合臺灣櫻花鉤吻鮭保育計畫之實施，武陵遊憩區之規劃以武陵農場南谷為主，範圍內大部分為武陵農場管有土地，除遊憩區南側及七家灣溪岸，維持原始自然景觀外，皆為農場現有設施。武陵農場內土地除部分放領予場員私有外，其餘均屬國有(包括建地、農業用地及道路)。本區內除農業、遊憩外，無其他產業活動，社會、經濟活動非常有限(王筱雯, 2010)。

#### 4.2 水文資料

本區年平均氣溫為 15°C 左右；桃山雨量測站(臺灣電力公司)為距七家灣溪之最近雨量站，於 1970 至 2012 年記錄期間，平均年降雨量為 1988.1 mm，最大累積降雨曾達 3250 mm (2008 年)，最小累積降雨為 767 mm (1969 年)。氣象局自 2016 年起於七家灣溪集水區境內之雪山東峰、雪山圈谷、桃山陸續設置氣象站，站況及 2017 年日雨量資料如圖 4-5。由 2017 年三站日雨量記錄可知，雪山東峰、雪山圈谷、桃山最大日雨量分別為 200 mm、250 mm、220 mm，年累積降雨量分別為 2547 mm、3488 mm、2875 mm。

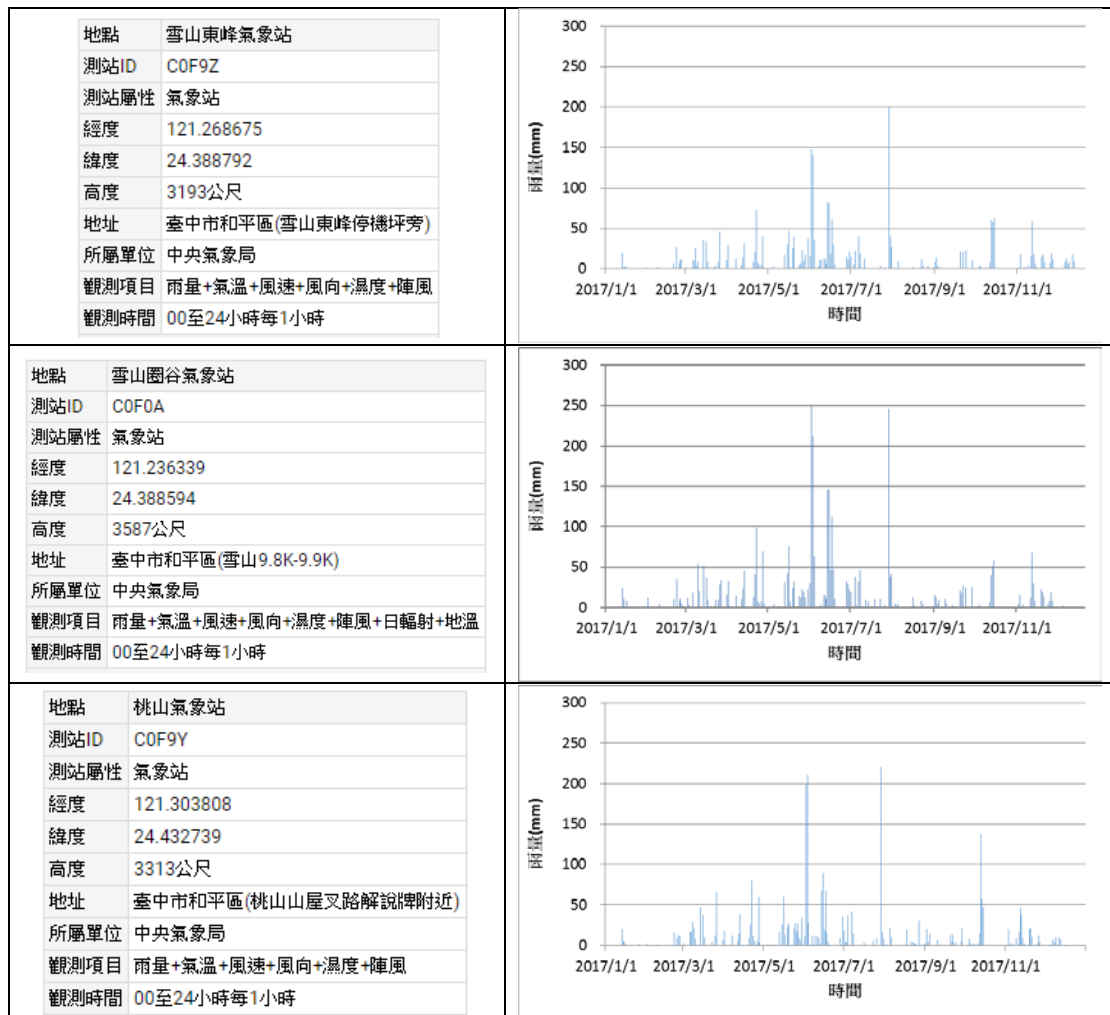


圖 4-5 雨量站站況及 2017 年日雨量

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

七家灣溪流域內設有流量站兩站，分別為臺灣電力公司所設置之有勝溪流量站與七家灣流量站。有勝溪流量站位於有勝溪，流域面積為 31.12 km<sup>2</sup>，流量資料由 1994 年開始記錄至今，最大瞬時流量為 233.95cms (2007/10/06)；七家灣流量站位於伊卡丸溪，流域面積 110.71 km<sup>2</sup>，流量資料由 1964 年開始記錄至今，最大瞬時流量為 884.70 cms (2005/07/18)。為了解七家灣溪水文事件發生之機率及對應之重現期流量，本團隊過去曾收集七家灣流量站 1981 年至 2012 年時流量資料(計 31 筆，於統計上符合樣本數多之條件)，以極端值選用法(Extreme-value series)選取各年之最大瞬時流量，並採用對數常態分佈(Logarithmic normal distribution)河川年最大洪水流量分佈來進行極端水文學之頻率分析(王定欽、陳文福，2007)。頻率分析結果如表 4-1，以供後續七家灣溪水文事件尺度判斷之參考依據。

同時，為評估臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心之淹水潛勢，本團隊亦透過集水區面積權重法推估臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心之年最大瞬時流量，並同樣藉由對數常態分佈方法進行頻率分析，以供保全區域淹水潛勢分析使用，結果如表 4-1。

表 4-1 七家灣流量站與臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心各重現期距對應之流量

	重現期距年							
	1.11	2	5	10	20	25	50	100
七家灣流量站								
集水區面積: 110.71 km <sup>2</sup>	35.2	149.1	313.6	450.9	603.8	656.6	833.2	1030.1
臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心								
集水區面積: 50.64 km <sup>2</sup>	30.2	109.4	223.9	319.4	425.8	462.6	585.4	722.5

單位: cms

由王筱雯(2011)所設置之萬壽橋水位測站記錄可知(圖 4-5)，自 2011 年 5 月 24 日壩體改善工程開始前至 2015 年 8 月 15 日期間七家灣溪共經歷十二次較大型之降雨事件(表 4-2)，造成水位大幅度變化，分別為九場颱風事件，米雷颱風(2011)、泰利颱風(2012)、蘇拉颱風(2012)、天平颱風(2012)、蘇力颱風(2013)、潭

美颱風(2013)、麥德姆颱風(2014)、蘇迪勒(2015)、杜鵑(2015)與一場東北季風鋒面降雨(2011)，及兩場梅雨事件(2012年6月10日與2013年4月6日)，於十二場事件之外其他時間亦有多次大小不一之小型降雨造成水位變化。萬壽橋水位測站所記錄之最高水位發生於2012年蘇拉颱風，水位約為4.75 m(2012/08/02 04:55)，為近20年重現期距之事件；次高水位發生於2015年蘇迪勒颱風，水位約為3.90 m(2015/8/8 15:00)，為近5年重現期距之事件(王筱雯，2015)。

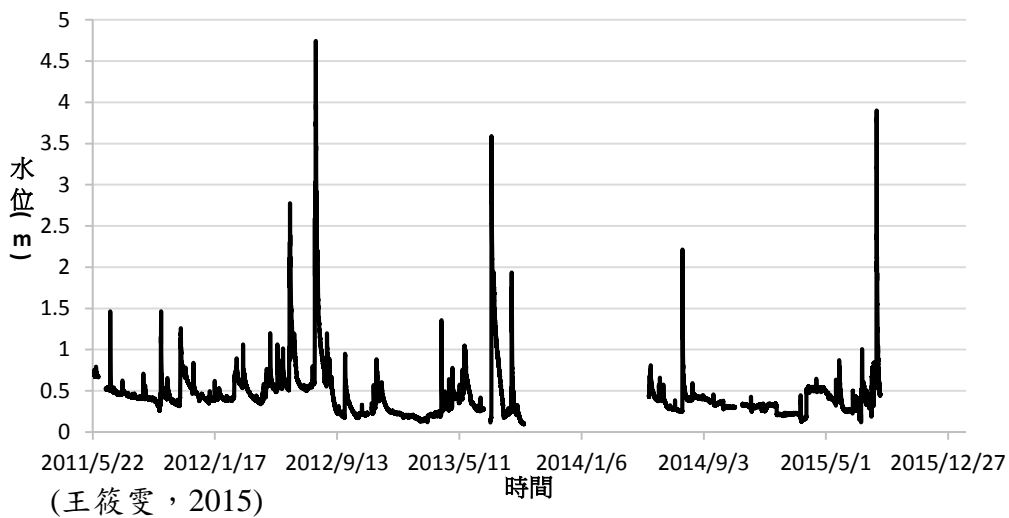


圖 4-6 萬壽橋水位測站之時水位資料

### 4.3 航照圖資料

本研究團隊曾向行政院農業委員會林務局農林航空測量所購買武陵地區航照圖，去除雲層及其他雜訊，並考量時間序列之變遷資訊，取得1980、1987、1996、2001、2003、2005、2008、2009年航照圖，利用地理資訊系統ArcGIS定位各年度航照圖(圖4-6)，進一步描繪七家灣溪歷年流路變化(圖4-7)，由圖可知流路於固定之兩岸邊界中擺盪。造成流路變遷的可能原因包含水文事件尺度、河床質粒徑組成、河谷配置、地質條件、漂流木、巨石或崩塌等因素影響，然而在相關資訊不足的情況下，僅藉由航照圖辨識，無法進一步分析造成流路變遷之原因。航照圖相關分析成果皆應用於物理棲地繪製、崩塌地判釋、大斷面調查等現場相關工作之底圖(王筱雯，2010；王筱雯，2012)。

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

農林航空測量所販售之衛星航照圖經過數道影像校正程序後點位精確，但因校正程序需耗費大量時間人力，故以七家灣溪而言，影像皆非即時成果；因近幾年來航拍設備器材進步，航拍成果經地理資訊系統 GIS 定位後已達可作研究用途之精度，本研究為取得較為即時之航拍影像資料，自費購置相關器材，並將拍攝成果應用於本研究。

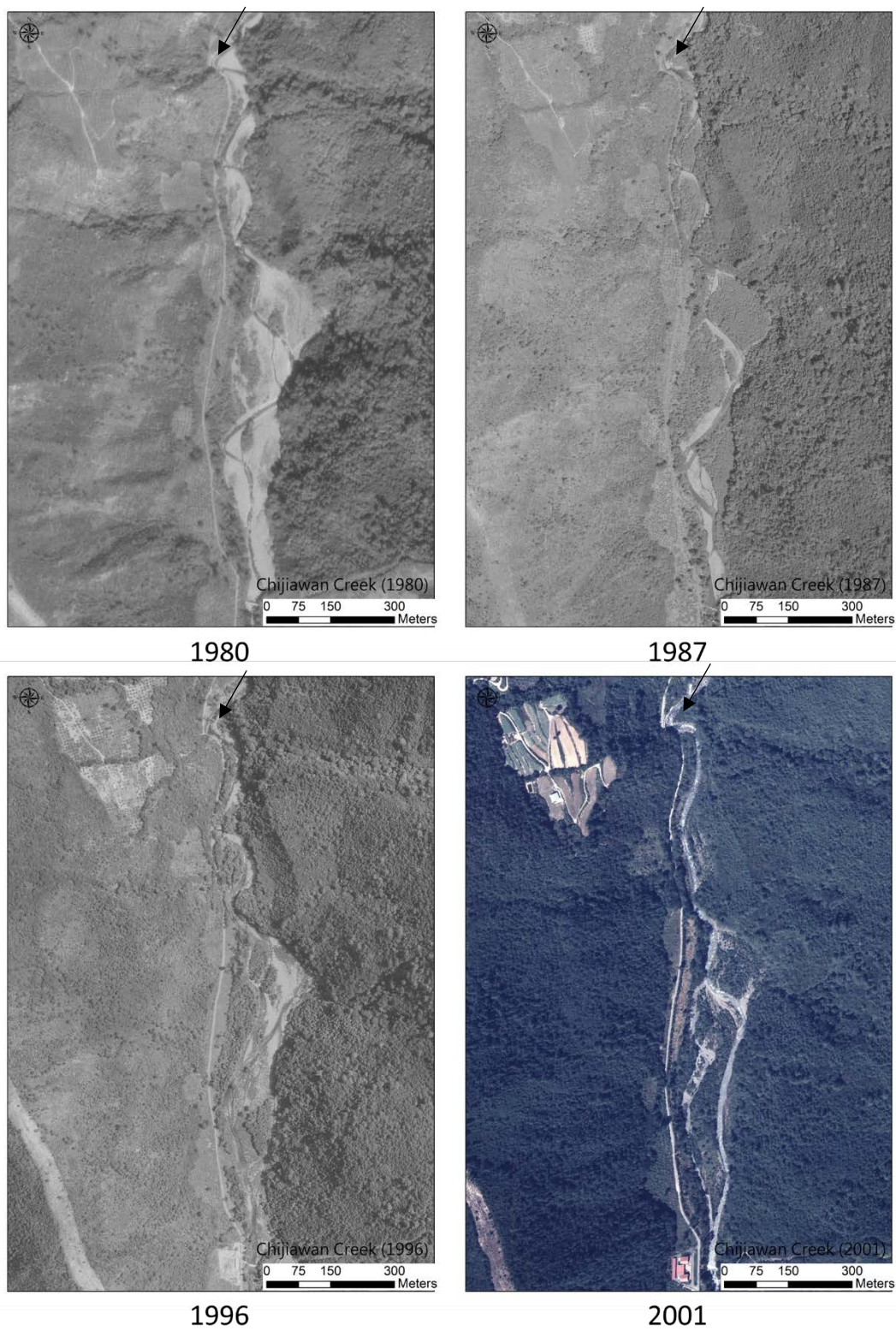


圖 4-7 七家灣溪歷年航照圖(1/2)



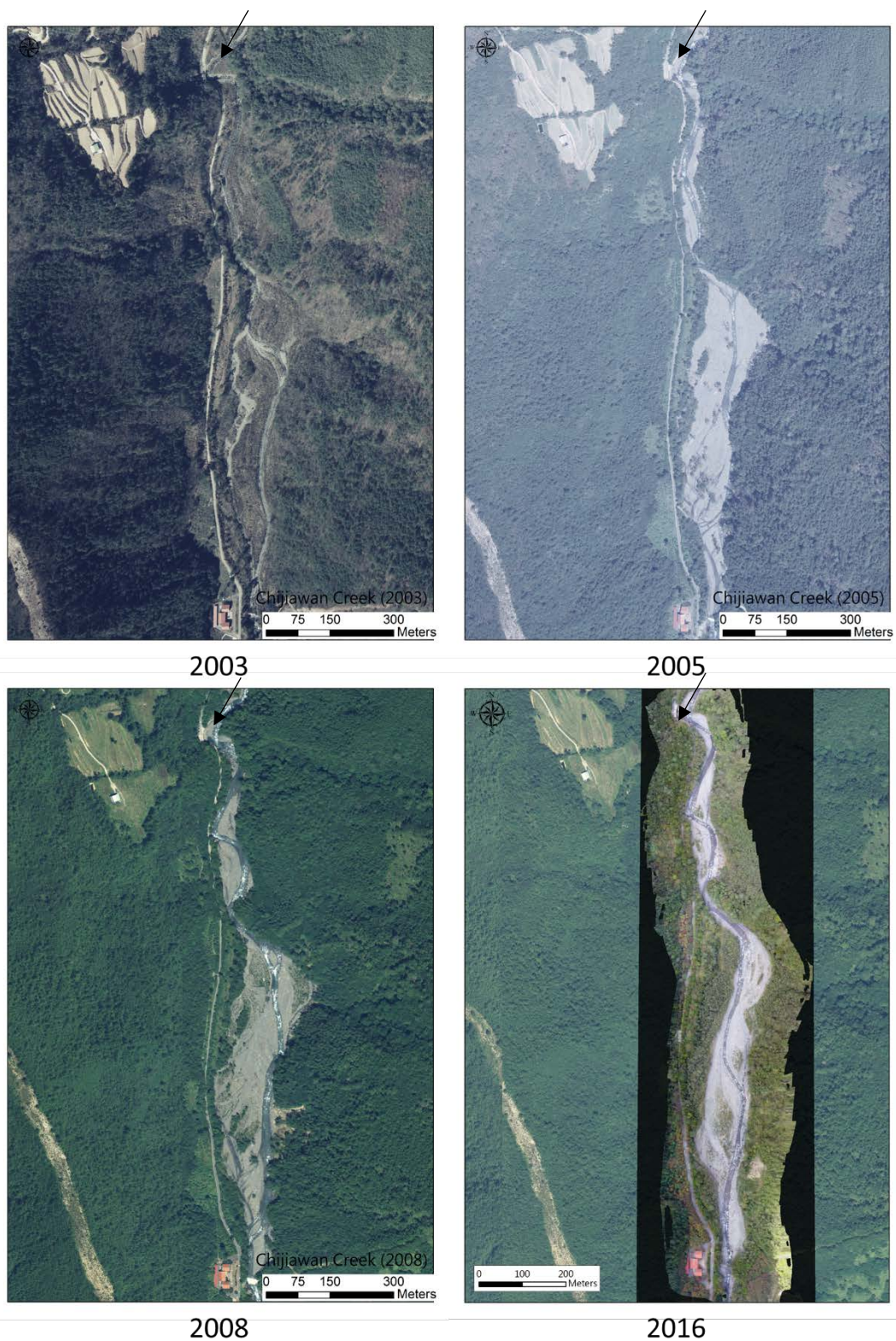


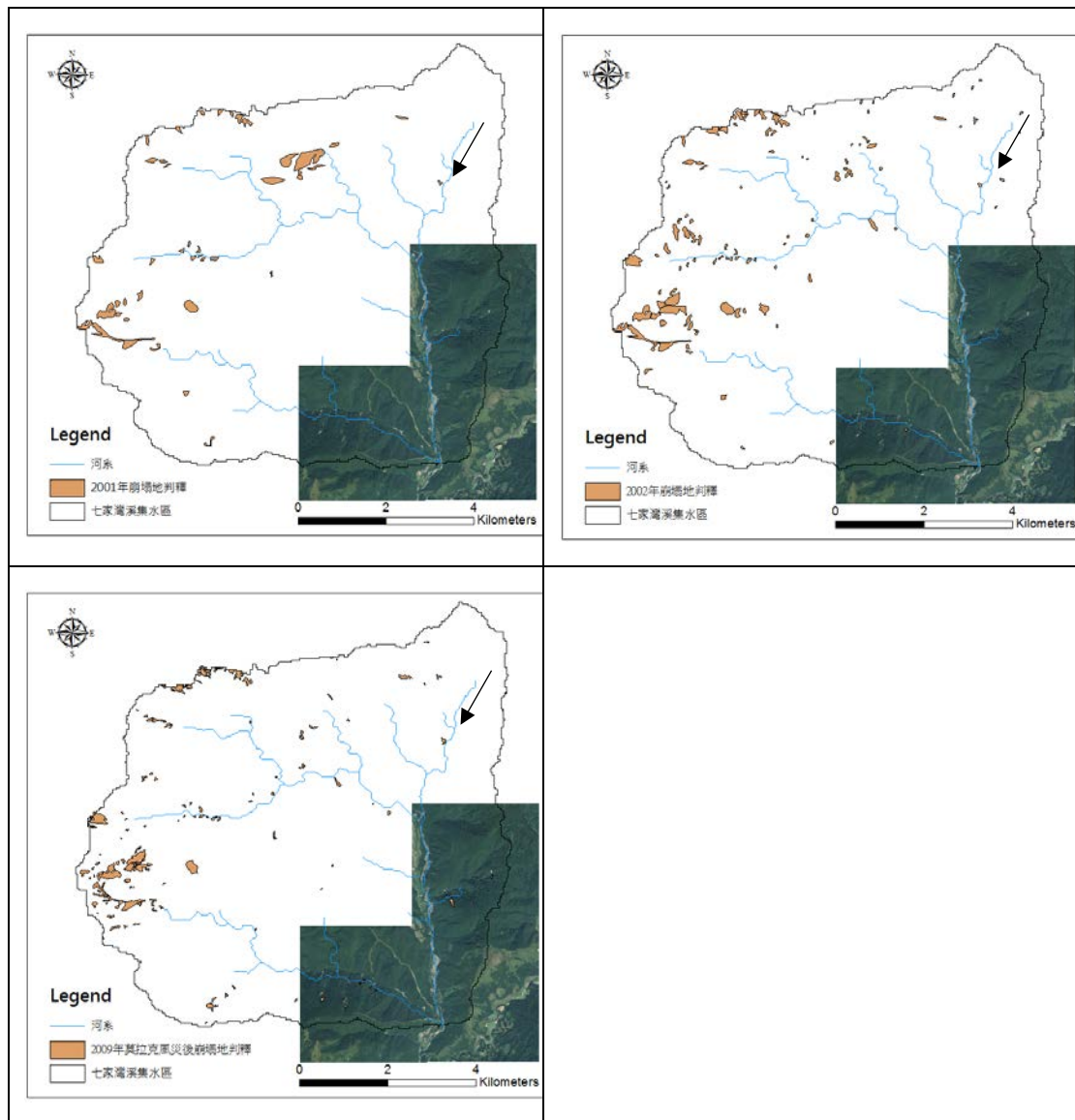
圖 4-7 七家灣溪歷年航照圖(2/2)



圖 4-8 1980 年~2016 年河道變遷情形

#### 4.4 崩塌地與岩盤判釋

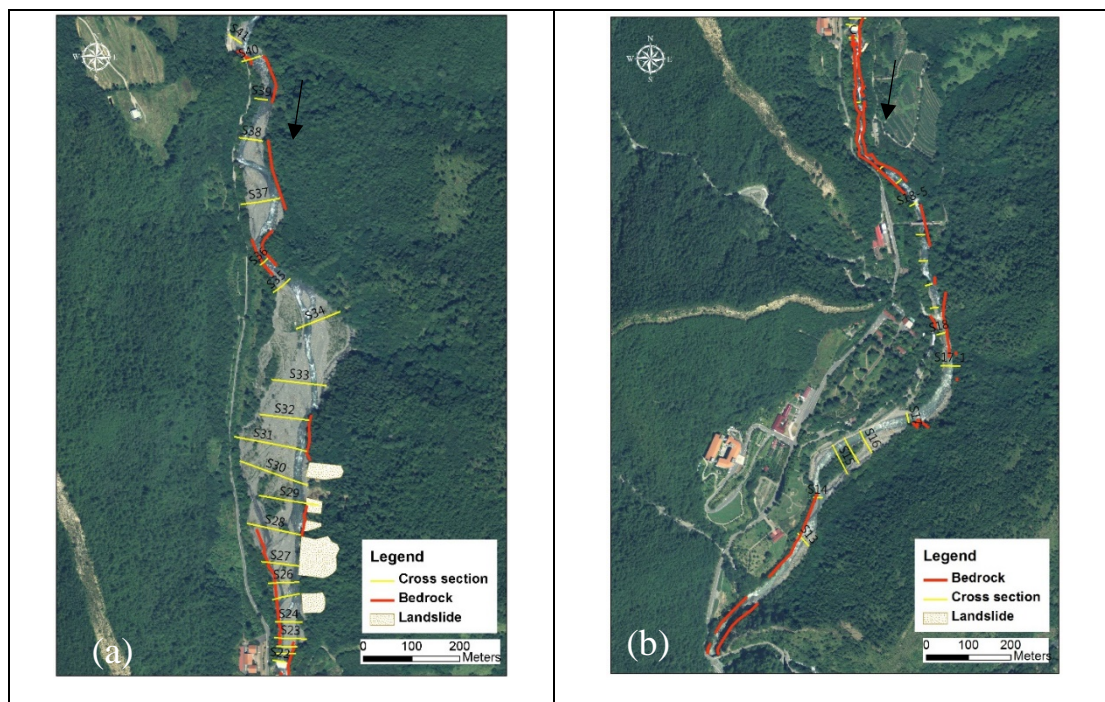
王筱雯(2010)蒐集研究區域崩塌地相關資訊，根據成功大學防災中心利用衛星航照圖判釋 2001 年(桃芝颱風前)、2002 年(桃芝颱風後)與 2009 年(莫拉克風災後)崩塌情形可知，七家灣河流域崩塌情形集中於集水區更上游源頭地區，且 2002 年崩塌地數量較 2001 年、2009 年多(如圖 4-8)，2001 年、2002 年及 2009 年之總崩塌面積分別 113 萬  $m^2$ 、279 萬  $m^2$  以及 180 萬  $m^2$ 。



(王筱雯，2010)

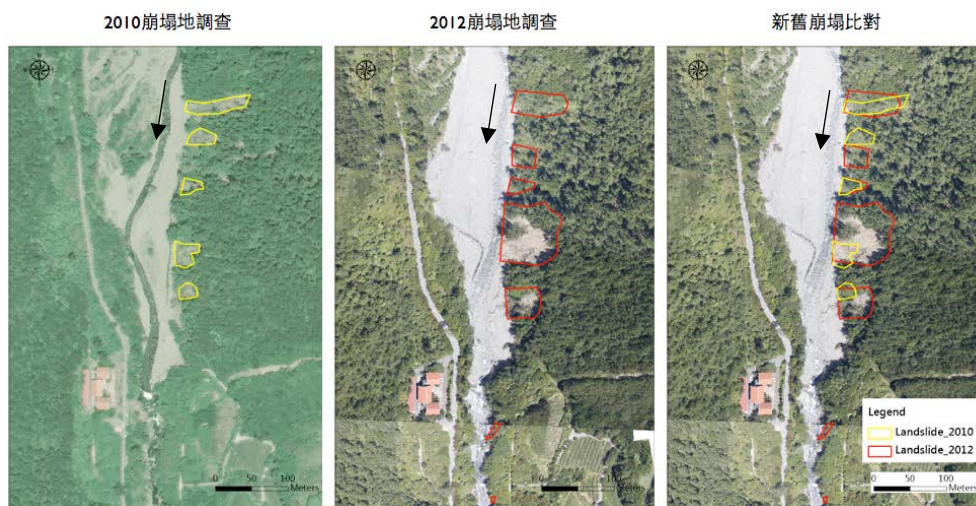
圖 4-9 七家灣流域 2001、2002、2009 年崩塌地變遷

王筱雯(2012)根據於農林航測所取得之 2010 年航照圖與 2012 年空拍機影像搭配現地調查，針對七家灣溪一號壩上游 1.4 km 至下游 1.8 km 之區域內進行邊坡崩塌位置與範圍之界定，以及岩盤狀態調查。由航照圖及空拍影像分析與現地調查結果得知一號壩上游 500 m 及下游 200 m 內共 7 處崩塌及岩盤外露區域 21 處，分布位置如圖 4-9(a)與 4-9(b)。其中，上游 115 m、250 m、310 m 及 425 m 等四處崩塌地為 2010 年(王筱雯, 2010)即已調查之舊有崩塌地，其餘三處皆為新生崩塌地(圖 4-10)，由崩塌位置來看，一號壩上游之崩塌皆鄰近既有崩塌或是既有崩塌面積加大，推估該處地質原本即較為脆弱，壩體改善後又適逢強降雨長延時洪水事件，降雨觸發崩塌。同時，側向侵蝕亦減弱坡腳支撐強度，故於原崩塌鄰近處加大原崩塌範圍或產生新崩塌；一號壩下游崩塌規模極小，崩塌處下方屬堅硬岩盤，上方岩石推估屬砂岩互層，推估為降雨破壞原本穩定狀態而觸發崩塌。至於岩盤部分，壩體改善前，可明顯發現七家灣溪一號壩下游左右岸之連續性岩盤裸露，壩體改善後，壩上游左右岸經歷數場大小不一的洪水事件後岩盤出露。



(王筱雯，2012)

圖 4-10 岩盤與崩塌地判釋 (a) 上游崩塌及岩盤裸露區域 (b) 下游崩塌及岩盤裸露區域



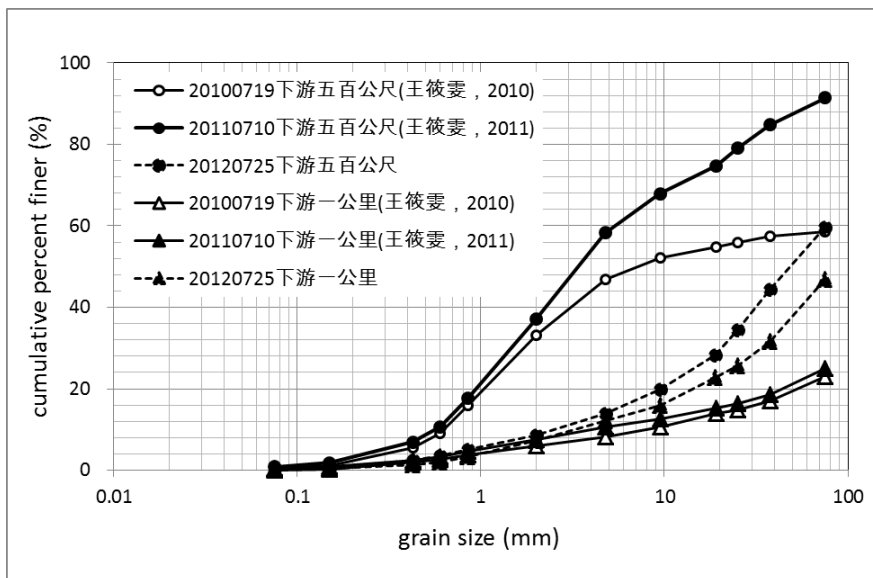
(王筱雯，2012)

圖 4-11 新舊崩塌地比對

#### 4.5 河床質資料

針對河道高灘地河床質變化，王筱雯(2011)於壩體改善後(2011年7月10日)針對七家灣溪一號壩上下游1 km 處以及下游500 m 處等共三處進行1 m×1 m×1 m 的主河道明坑挖掘採樣，採樣與粒徑分析方式乃根據水土保持技術規範第37條之規範，並進一步與壩體改善前(2010年7月19日)採樣成果進行比對(王筱雯，2011；王筱雯、郭偉丞，2011)。本研究團隊主持人參與水利規劃試驗所(2012)相關研究，進一步於壩體改善一年後(2012年7月25日)針對七家灣溪一號壩下游500m、1 km 處進行主河道明坑挖掘採樣。由粒徑分析結果可知下游500 m 處之代表粒徑  $D_{50}=75 \text{ mm}$  ( $D_{30}=25 \text{ mm}$ )；下游1 km 處之代表粒  $D_{30}=37.5 \text{ mm}$ 。

壩體改善前後河道內下游1 km 內泥砂粒徑級配比較如圖4-11，由下游500 m 處的粒徑分布可明顯看出壩體改善一年後，細顆粒泥砂歷經數次降雨事件後被帶往更下游，因此造成河道粗化現象；至於在下游1 km 處，由於2010年及2012年兩次採樣點皆位於高灘地上，並未受水文事件影響且植生密布，粒徑級配曲線幾乎完全沒有變化。



(王筱雯，2015)

圖 4-12 七家灣溪一號壩明坑挖掘下游各區粒徑級配比較圖

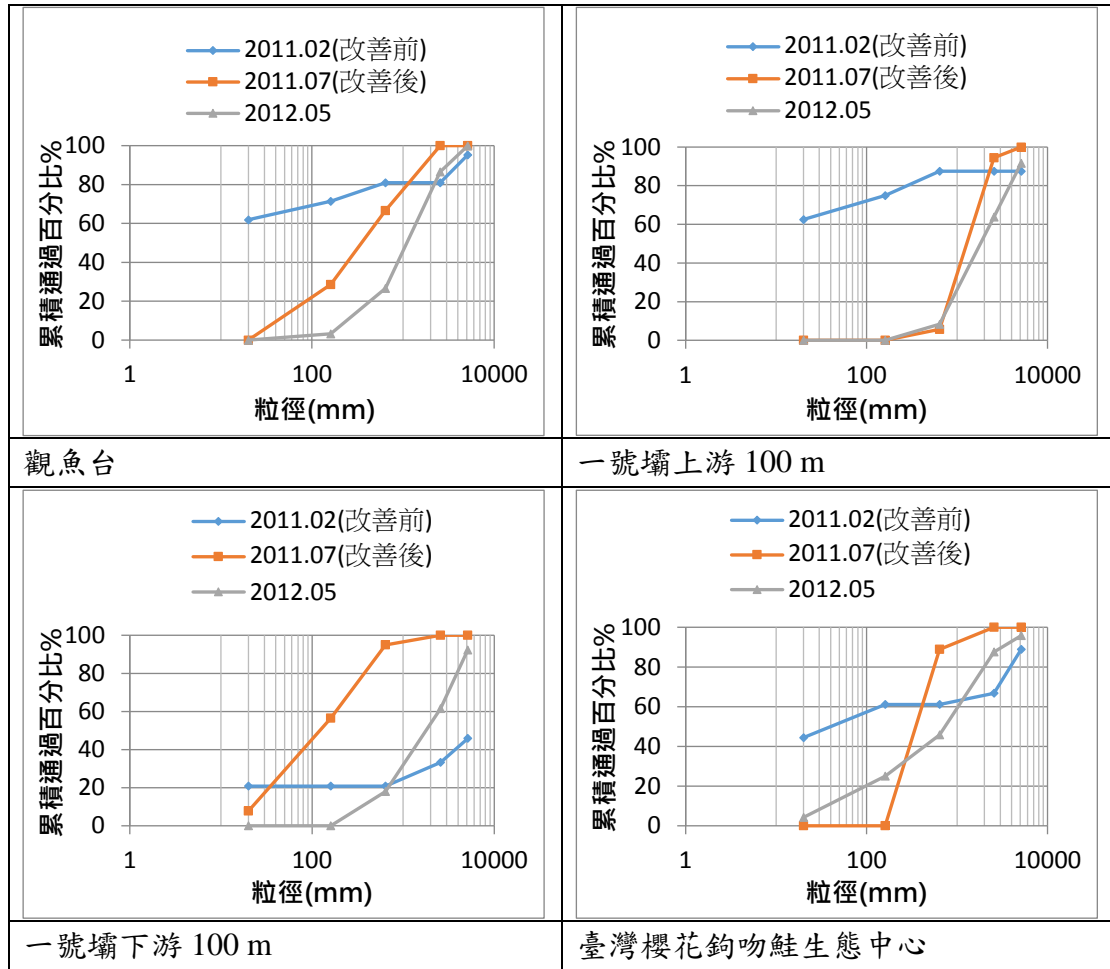
## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

針對河道行水區河床質變化，逢甲大學葉昭憲老師研究團隊於 2011 年至 2015 年期間進行於觀魚臺(壩上游約 1.4 km)、一號壩上游 100 m、一號壩下游 100 m 與臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心(壩下游約 800 m 處)四個樣站棲地底質調查。量測方法為設置間距 20 m 之穿越線，先測定各河段之河寬後，於河寬 1/4、2/1 與 3/4 處分別以腳踏法和目視法判定來觀測底質礫石。

由 2011 至 2012 年調查中發現(如圖 4-13)，觀魚臺樣站底質有粗化現象發生。由於觀魚臺樣站位於遠離溯源侵蝕河段，因此底質粒徑變化主要是受水文事件所影響；而隨著壩體改善後，原淤積於庫區後方的細粒料泥砂被帶往下游，造成一號壩上游 100 m 處底質有粗化現象，並隨時間推移有更明顯之粗化趨勢；一號壩下游則因上游帶下來的細粒料泥砂淤積於下游，一號壩下游 100 m 底質初期有明顯細化，隨時間推移細粒料泥砂又繼續往下游運移造成底質粗化現象，整體而言，底質仍較壩體改善前細化；臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心於壩體改善後，初期同樣有細化現象，隨時間推移逐漸有粗化現象，但整理而言底質同一號壩下游 100 m 樣站偏向細化。

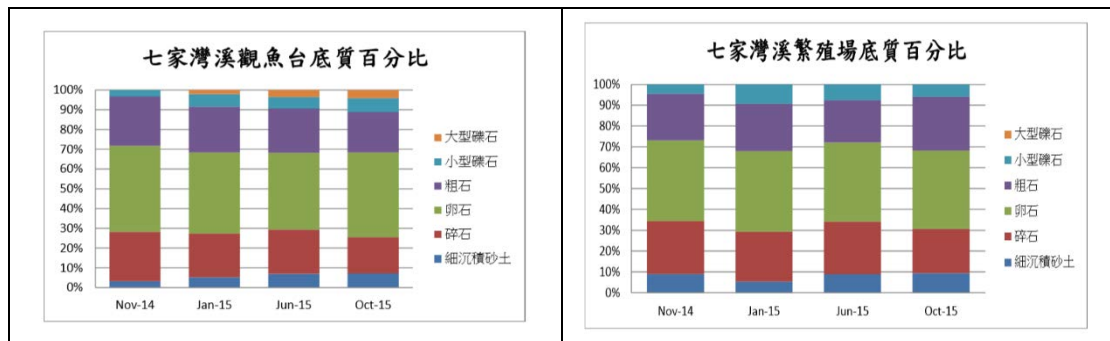
由 2014 年 11 月至 2015 年 10 月觀魚臺樣站和臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心樣站的底質調查中發現(如圖 4-14)觀魚臺樣站大型礫石的比例有略增的趨勢，可能是因為蘇拉颱風 20 年重現期距流量啟動粗粒料運移所影響，而其他粒徑組成並沒有明顯的變化；而由繁殖場樣站結果可看出 2015 年中各次的調查結果中大粒徑底質的比例皆高於 2014 年 11 月(葉昭憲，2015)。

比較本研究團隊與葉昭憲老師研究團隊之成果顯示，雖兩團隊採樣地點及方法不同，但七家灣溪下游河道於壩體改善後皆呈現一個先細化再粗化的現象。



(資料來源：逢甲大學葉昭憲老師團隊；林幸助等人，2011；林幸助，2012，本研究重製)

圖 4-13 七家灣溪各樣站底質採樣結果比較



(資料來源：葉昭憲，2015)

圖 4-14 七家灣溪底質比例





## 第五章 影像監測與現地調查

本團隊為探討壩體改善後河相改變對臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心之可能影響，延續王筱雯(2011；2014；2015；2016)於七家灣溪一號壩及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心右岸設置影像監測系統進行監測，及雪霸國家公園新架設之水文、泥砂監測站。除上述定點監測儀器外，本團隊亦針對七家灣溪進行縱橫斷面調查及現地調查，以評估河道環境之溯源侵蝕、側向侵蝕、崩塌地。

本計畫之影像監測與現地項目及結果如下：

### 5.1 定點監測

#### (一)影像監測

為掌握洪水期間一號壩及臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道可能影響，本團隊將延續王筱雯(2011)於 2011 年 5 月 24 日於七家灣溪一號壩下游右岸位置(面向上游拍攝)之影像監測系統及王筱雯(2014)於臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心右岸位置(面向左岸拍攝)新設置之影像監測系統，藉以記錄洪水事件完整歷程，監測系統採用高解析度的 IP Camera (EV8781F IP Camera，Video:2592 x 1920)，影像監測系統相關照片如圖 5-1。



圖 5-1 水文、泥砂及影像監測系統相關照片

本團隊根據 2017 年水位影像監測記錄已掌握到 2017 年 6 月 2 日~6 月 8 日梅雨及 7 月 29 日尼莎颱風為較大型水文事件，比較一號壩 5 月 31 日、6 月 8 日及 10 月 28 日影像監測記錄(圖 5-2)，可發現梅雨事件期間一號壩上游河段左岸河段未有明顯之河岸侵蝕情形發生且高灘地植生完整，尼莎颱風後，可知 2017 年所發生之降雨事件皆未對壩上游 50 m 至 200 m 左岸邊坡穩固及安全造成威脅；另一方面，比較臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心 6 月 1 日、6 月 8 日及 10 月 28 日影像監測記錄(圖 5-3)，亦顯示河道環境並無明顯變化。

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

王筱雯(2012)指出壩體改善後，壩體上游河段於 2012 年經歷梅雨、泰利颱風以及蘇拉颱風，壩上游 50 m 內左右岸土砂幾乎已侵蝕至岸壁處，壩上游左岸 50 m 至 200 m 側向侵蝕則接近邊坡坡腳處，根據本團隊 2017 年影像監測結果得知，一號壩上游並無明顯河岸侵蝕情形發生。

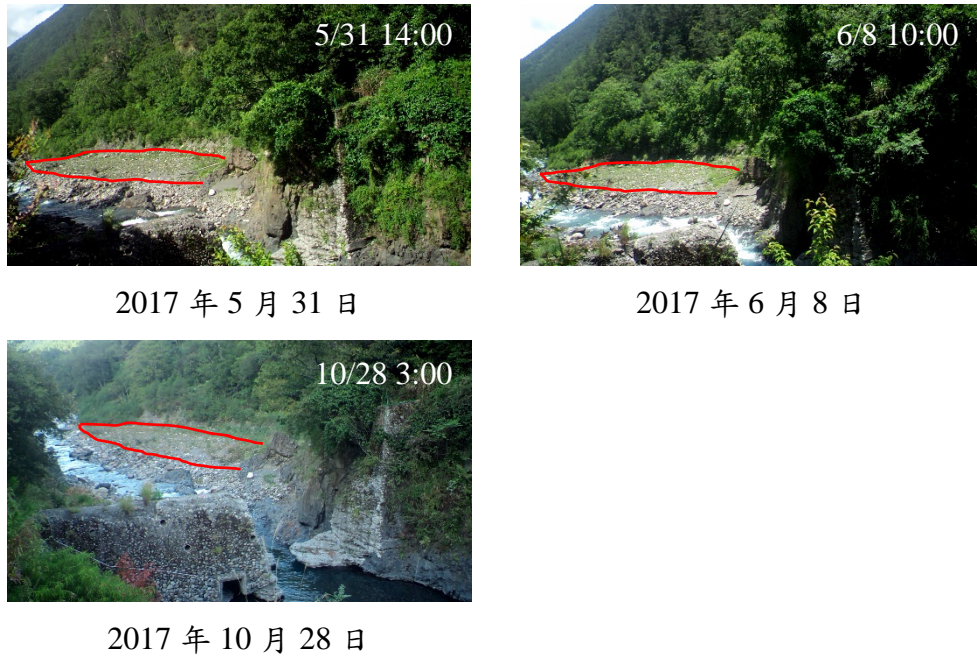


圖 5-2 七家灣溪一號壩測站監測影像

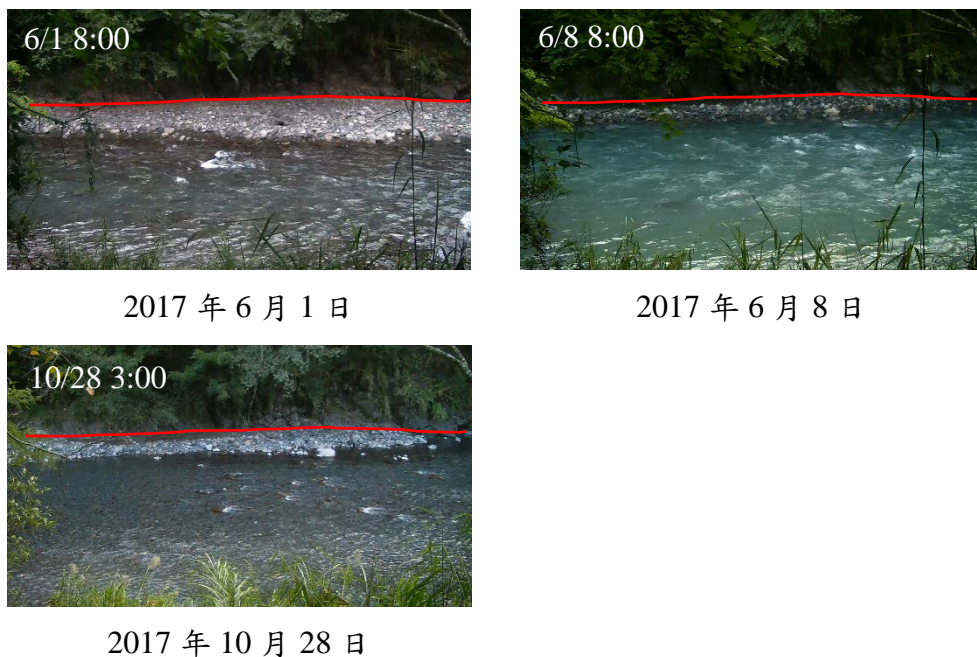


圖 5-3 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心測站監測影像

## (二) 水文泥沙監測

2011 年 5 月 24 日，王筱雯(2011)於萬壽橋測站架設雷達波水位計與濁度計、於兆豐橋測站架設雷達波水位計，以及於觀魚臺測站架設壓力式水位計與濁度計，並開始進行水位、濁度監測。直至 2012 年 8 月蘇拉颱風，觀魚臺測站水位計與濁度計以及萬壽橋測站濁度計，遭受洪水沖毀流失。而兆豐橋測站與萬壽橋測站之水位計，則因儀器老舊與雨水滲入而分別於 2013 年 10 月 28 日及 2015 年 8 月 15 日相繼損壞。雪霸國家公園管理處為持續針對七家灣溪進行水文泥沙監測，於 2017 年 1 月 11 至 16 日期間進行水文、泥砂新測站架設。

### 1. 水位

水文測站設置於萬壽橋(如圖 5-1)，量測項目包含水位及流速，水位量測係採用 Vegapuls 61 非接觸式雷達波水位計，該型水位計頻率為 26 GHz，最大量測深度至少可達 30 m，量測精確度至少可達 $\pm 3$  mm，適用溫度由 $-10^{\circ}\text{C}$ 至 $60^{\circ}\text{C}$ ；流速量測係採用 Sommer RG-30 微波雷達表面流速儀，該型流速儀頻率為 24 GHz，量測範圍介於 0.1~15 m/s，量測精度為 $\pm 0.01$  m/s，量測距水面距離為 0.5~130 m，兩者皆符合研究區域之現地環境條件要求。

圖 5-4 為王筱雯(2011)於 2011 年所設置之萬壽橋水位測站記錄，以及 2017 年新設置之水位測站自 2017 年 1 月 11 日記錄至今之水位記錄，並且根據王筱雯(2015、2016)所提出之監測指標，以壩體改善至今有記錄之最大水文事件蘇拉颱風，訂定萬壽橋警戒水位為 4.75 m。新站同樣以水位計下之河床高程為基準點(起始水位值為 0 m)，在考量水位計下河床變動下，本團隊至現地量測水位計至河床之距離(H)，進一步由水位計測值(Z)來換算實際水位值(H-Z)，以校正兩次調查間之水位記錄。本團隊於 2017 年 1 月 11 日至 10 月 16 日共進行 7 次七次現地量測(表 5-1)，由結果可知調查期間水位計至河床的距離於 13.05 m 至 14.01 m 之間變動，亦顯示河道有沖淤互現的情形發生。根據 2017 年 1 月 11 日至 2017 年 11 月 16 日水位紀錄，期間七家灣溪經歷兩場較大型之降雨事件(表 5-2)，造成水位

106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

大幅度變化，分別為 2017 年 6 月 2 日梅雨、6 月 15 日梅雨、7 月 29 日尼莎颱風及 10 月 13 日豪雨，最高水位約 3.57 m (2017/7/29 23:00)。於三場事件之外其他時間，亦有多次大小不一之小型降雨造成水位變化。

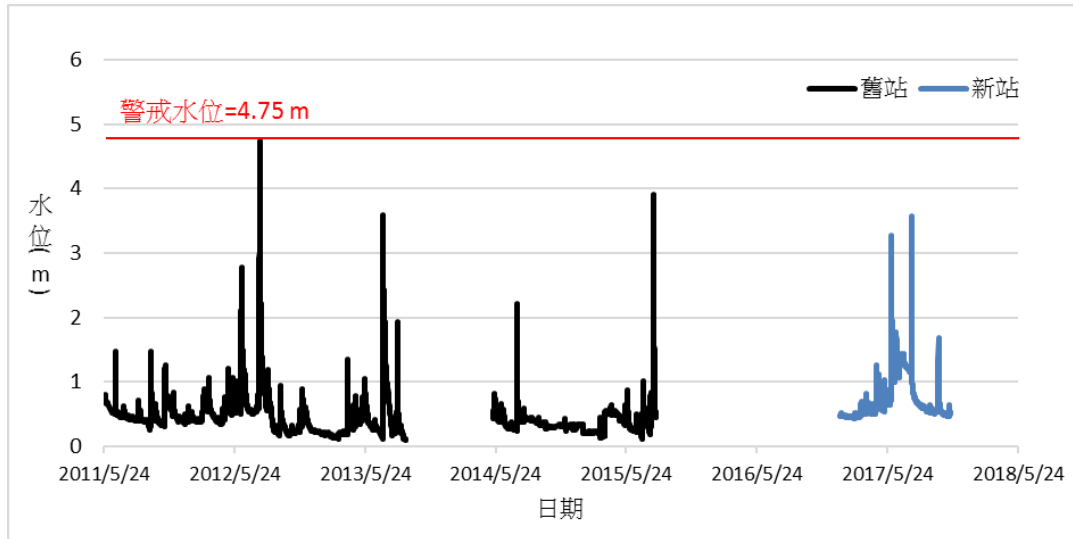


圖 5-4 萬壽橋水文測站-水位

表 5-1 水位計至河床距離與量測時間

日期	時間	水位計至河床之距離 (m)
2017 年 1 月 11 日	18:20	13.97
2017 年 5 月 18 日	10:10	13.71
2017 年 6 月 8 日	17:00	13.69
2017 年 6 月 26 日	17:00	14.01
2017 年 7 月 25 日	15:50	14.00
2017 年 7 月 31 日	15:50	13.54
2017 年 10 月 16 日	11:00	13.05

表 5-2 2011~2017 年各事件最高水位值

降雨事件	日期	萬壽橋最大時水位(m)
米雷颱風	2011/6/23~25	1.46 (2011/6/25 11:00)
東北季風	2011/10/3	1.42 (2011/10/3 9:00)
梅雨	2012/6/12	2.79 (2012/6/12 12:00)
泰利颱風	2012/6/19~21	1.19 (2012/6/20 19:00)
蘇拉颱風	2012/7/30~8/3	4.75 (2012/8/2 4:00)
天秤颱風	2012/8/21~25	1.20 (2012/8/24 3:00)
梅雨	2013/4/6	1.36 (2013/4/6 2:00)
蘇力颱風	2013/7/11~13	3.59 (2013/7/13 5:00)
潭美颱風	2013/8/20~22	1.94 (2013/8/21 21:00)
麥德姆颱風	2014/7/21~23	2.21 (2014/7/23 6:00)
蘇迪勒颱風	2015/8/6~9	3.90(2015/8/8 15:00)
梅雨	2017/6/2	3.28 (2017/6/2 18:00)
梅雨	2017/6/15	1.78 (2017/6/15 23:00)
尼莎颱風	2017/7/29	3.57 (2017/7/29 23:00)
豪雨	2017/10/13	1.68 (2017/10/13 23:00)

## 2. 流速

萬壽橋流速測站自 2017 年 1 月 11 日開始記錄至今，根據 2017 年 1 月 11 日至 2017 年 11 月 16 日流速紀錄顯示(圖 5-5)，流速介於 0.45 m/s~5.57 m/s 之間，最大流速發生在 2017 年 6 月 2~8 日梅雨事件期間(2017 年 6 月 2 日 18:00)。

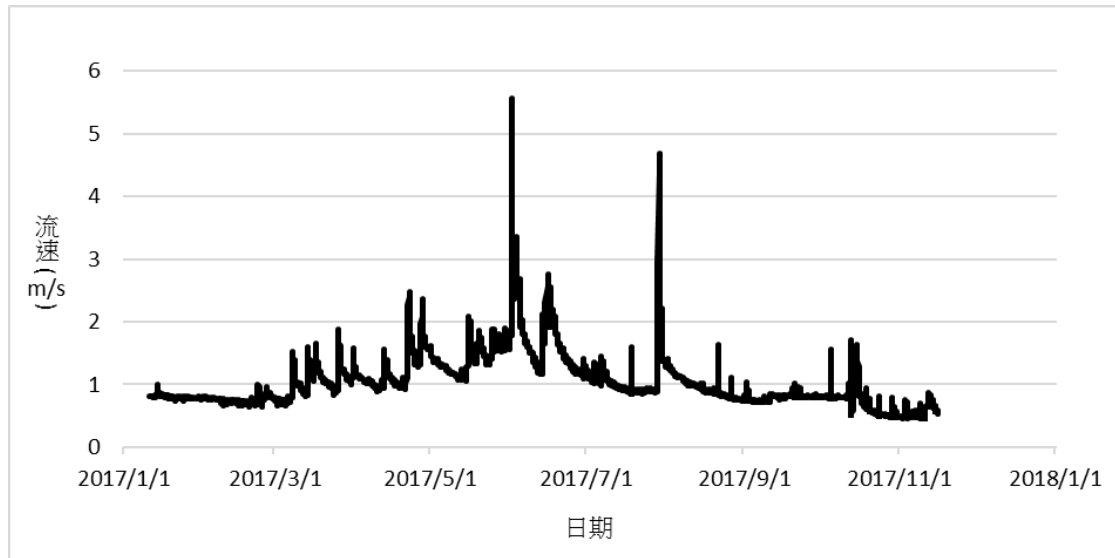


圖 5-5 萬壽橋水文測站-流速

### 3. 濁度

濁度監測儀器設置於三處(如圖 5-1)，分別為一號壩上游約 1.4 km 處之觀魚臺、七家灣溪一號壩壩址處，以及一號壩下游 1.8 km 處之萬壽橋。基於現地環境限制以及儀器安全性考量，觀魚臺測站濁度計架設於右岸岩盤後方深潭處，因濁度計沒入水體而可持續進行濁度監測；一號壩測站濁度計架設於一號壩壩體下游側，萬壽橋測站濁度計架設於右岸岩盤後方，兩測站需待水文事件發生，濁度計沒入水體後才可進行濁度監測。在空間上，觀魚臺測站可代表未受到壩體改善影響之背景參考值，一號壩測站可代表壩體改善影響範圍之濁度值，萬壽橋測站則代表七家灣溪與高山溪匯流後之濁度值。所採用之儀器為 Analite NEP180 型濁度計，此濁度計之建議最佳水樣濁度測值區間為 0 至 10,000 NTU，儀器誤差約為 3%，最高濁度測值可至 30,000 NTU，但當水體濁度超過 10,000 NTU，儀器誤差會由 3% 攀升至 5%。

觀魚臺、一號壩及萬壽橋三站濁度自 2017 年 1 月 12 日開始記錄至今，2017 年 1 月 12 日至 2017 年 11 月 16 日濁度紀錄如圖 5-6 所示。



## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

觀魚臺測站於 4 月 23 日至 5 月 6 日期間，因零星降雨事件造成濁度變化，濁度最高達 4,970 NTU (2017/5/4 01:00)，由於一號壩測站及萬壽橋測站濁度計並未沒入水體，因此並無濁度記錄。

6 月 2 日梅雨為今年第一次大雨事件，期間觀魚臺測站濁度最高為 2,668 NTU (2017/6/4 15:00)，一號壩測站濁度最高值達 1,412 NTU (2017/6/2 18:00)，萬壽橋測站濁度最高值達 1,771 NTU (2017/6/2 18:00)，同一時刻，觀魚臺濁度為 1,114 NTU (2017/6/2 18:00)，由此事件可知濁度在經過壩體改善影響河段及高山溪匯流後有增加之趨勢，但影響程度僅約 300 NTU。在濁度回復時間方面，觀魚台、一號壩、萬壽橋測站濁度達尖峰值後，分別經過 34、50、64 小時後回復至事件發生前之濁度值，顯示濁度值越高的測站，其濁度恢復需越長的時間。

7 月 29 日尼莎颱風期間，濁度並無太大變化，觀魚台、一號壩及萬壽橋測站最高濁度分別為 709 NTU (2017/7/29 22:00)、814 NTU (2017/7/29 22:00)及 1,195 NTU (2017/7/29 22:00)。

10 月 13 日豪雨期間，萬壽橋濁度最高達 3,570 NTU (2017/10/15 16:00)，而觀魚台測站與一號壩測站無明顯濁度變化(100 NTU 上下)，根據本團隊現地踏勘結果一號壩下游並無崩塌情形，萬壽橋測站之濁度值飆高為受高山溪入流影響，推測高山溪集水區河道沖刷劇烈或有崩塌情形發生。

本團隊以各站濁度與萬壽橋水位資料進行比對，萬壽橋測站於 2017 年 4 月 23 日降雨事件期間，濁度值最高達 2,799 NTU (2017/4/23 4:00)，對應水位為 1.08 m。又 10 月 13 日豪雨期間，濁度值最高達 3,570 NTU (2017/10/15 16:00)，對應水位為 1.45 m；而於 6 月 2 日梅雨事件期間，濁度最高值約為 1,771 NTU (2017/6/2 18:00)，對應水位為 3.28 m；7 月 29 日尼莎颱風期間，濁度最高值約為 1,195 NTU (2017/7/29 23:00)，對應之水位為 3.57 m，本團隊透過統計回歸分析得知水位與濁度兩因子無正相關性；於 2011 年 11 月至 2012 年 7 月之資料亦可發現此一趨勢存在，於較大型之降雨事件中所測得的濁度值並不為最高之濁度值，推測是因

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

水位與濁度上升有時間稽延(time lag)關係(王筱雯，2012)，又或受高山溪支流河道沖刷與上游有無崩塌崩塌等砂源影響。由於水位與濁度之關係複雜，王筱雯、劉紋伶(2014)應用 SPSS 統計分析軟體分析七家灣溪水文資料之自相關係數、二元交叉相關係數與移動平均法，得知各個水砂因子隨著時間與空間的變化所表現出來的特性，進而了解在不同因子之間相互影響的關係及其稽延時間。該研究採用 2011 年 6 月 17 日至 2012 年 7 月 31 日觀魚台時水位與時濁度進行二元交叉相關係數分析，由結果得知觀魚台的水位與濁度具有 6 至 8 個小時的稽延時間，表示當觀魚台的水位上升時，觀魚台濁度須經過 6 至 8 個小時之後才會開始上升，惟正確性有待後續研究進一步探討。

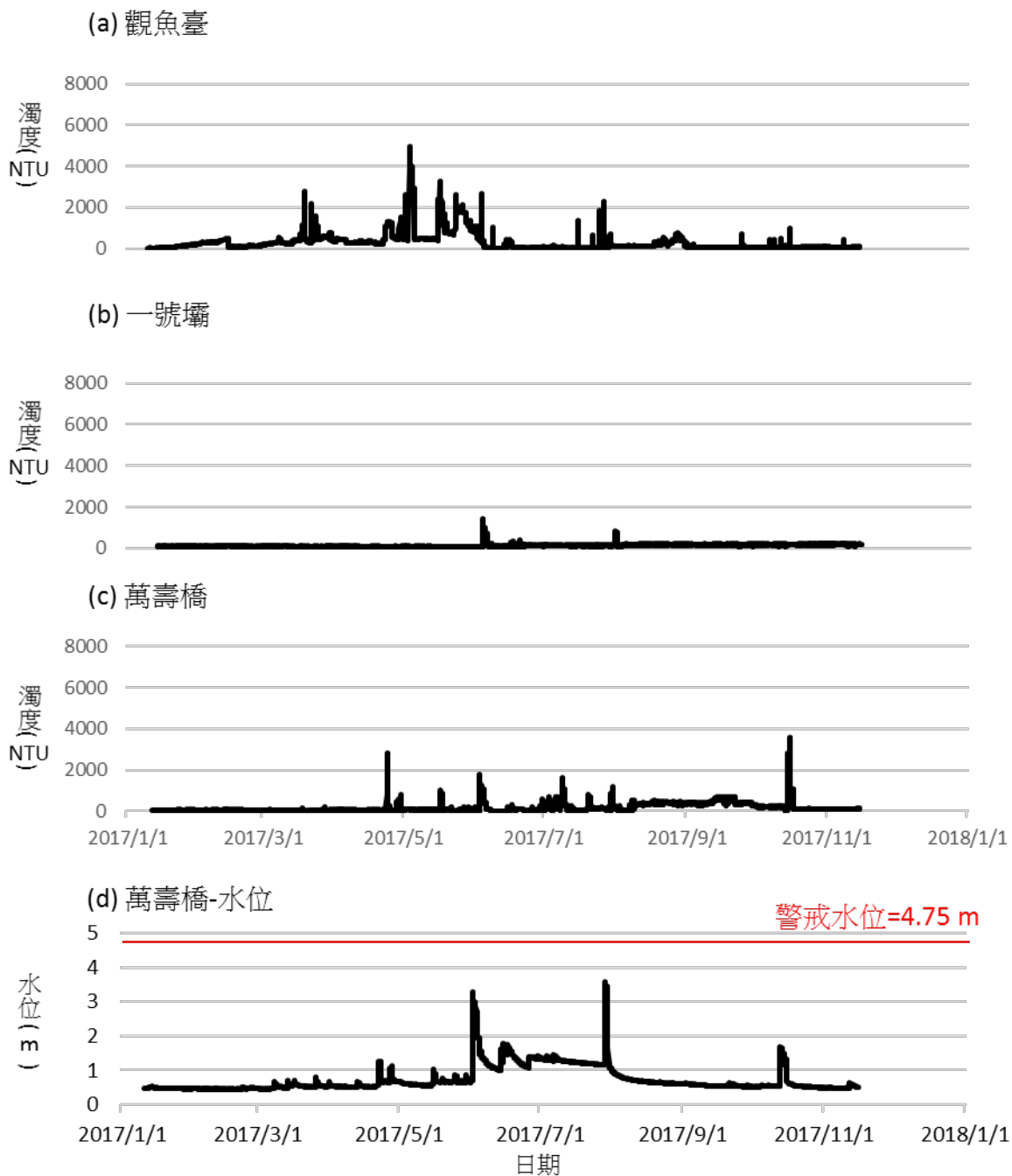


圖 5-6 水文測站濁度(a)觀魚臺、(b)一號壩、(c)萬壽橋與(d)萬壽橋水位

## 5.2 現地監測

### (一) 斷面調查

地形量測可幫助了解七家灣溪河道環境整體狀況，如河道坡度、溯源侵蝕、侵蝕土方量變化等，以及一號壩上游 50 至 200 m 之左岸側向侵蝕情形與臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之淹水潛勢。在同一測量範圍、點數密度的情況下，各種測量地形方法之成本、精度與限制比較如表 5-3，在山區衛星訊號不佳與經費受限的情況下，本團隊採用電子全站儀(Leica FlexLine TS02)進行河道地形調查：(1)於七家灣溪一號壩上游約 1.4 km (觀魚臺)及下游約 1.8 km (萬壽橋)之河段進行縱斷面量測，以了解河道溯源侵蝕終點位置；(2)於一號壩上游 50 m 處進行橫斷面量測，以了解河道側向侵蝕情形，選擇斷面為斷面編號 S23；S23 斷面，河寬約 70 m，右岸為岩盤地形緊鄰道路及武陵管理站，左岸為可侵蝕之河岸邊坡(圖 5-7)；(3)於臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道進行橫斷面量測，以了解河道環境狀況並供後續河道可通洪能力計算使用，選擇斷面為壩下游約 800 m (斷面編號 S18)與壩下游約 880 m (斷面編號 S17-1)；S18 斷面位於高山溪與七家灣溪匯流口下游約 30 m 處，河寬約 33 m，右岸建築為臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心，左岸為連續岩盤(圖 5-8)；S17-1 位於 S18 斷面下游約 80 m 處，河寬約 43 m，兩岸皆為植生(圖 5-8)；以及(4)於萬壽橋處進行橫斷面量測，以做為流量推估之參考斷面，選擇斷面為斷面編號 S9；S9 斷面，位於七家灣溪與有勝溪匯流口上游約 10 m 處，河寬約 22 m，左右岸皆為連續之岩盤。

本研究為量化斷面量測之結果，以 2010 年 4 月 11 日調查(S23 斷面)與 2012 年 2 月 13 日調查(S17-1 與 S18 斷面)為基準，應用 MATLAB (MATrix LABoratory, 版本 R2016a)以積分法計算各次斷面調查之面積變動量。

表 5-3 河道地形測量方法比較

測量方法	全測站		即時動態定位技術(Real Time Kinematic, RTK)	光達 (Light Detection and Ranging, LiDAR)	
	具反射稜鏡	不具反射稜鏡		空載 Airborne LiDAR	地面 Terrestrial LiDAR
儀器型號	TS02 (Leica)		GPS 1201 (Leica)	SHOALS-1000T (Optech)	Scanstation C10 (Leica)
測量媒介	近紅外光		衛星	雷射	雷射
測量限制	夜間測量受限		至少需接收 5 顆衛星；易受遮蔽物影響接收訊號	水深量測範圍為 0.2 m~50 m，較淺水深無法測得；無法穿透茂密植被區	
測量精度	1.5 mm+ 2*10 <sup>-6</sup> *D	2 mm+ 2*10 <sup>-6</sup> *D	水平方向 1-2 cm 垂直方向 2-3 cm	水平: 25 cm 垂直: 2.5 m	位置: 6 mm 距離: 4 mm
測量距離	3500 m	400 m	N/A	215 m	300 m
測量時間	長	長	中	短	短
後處理時間	短	短	短	長	長
儀器價格	低(數十萬)		中(近百萬)	昂貴(數千萬)	高(數百萬)
人力需求	大	大	小	小	小

資料來源：本研究整理



圖 5-7 S23 斷面左岸河道環境  
(照片為本研究於 2015 年 1 月 28 日拍攝)

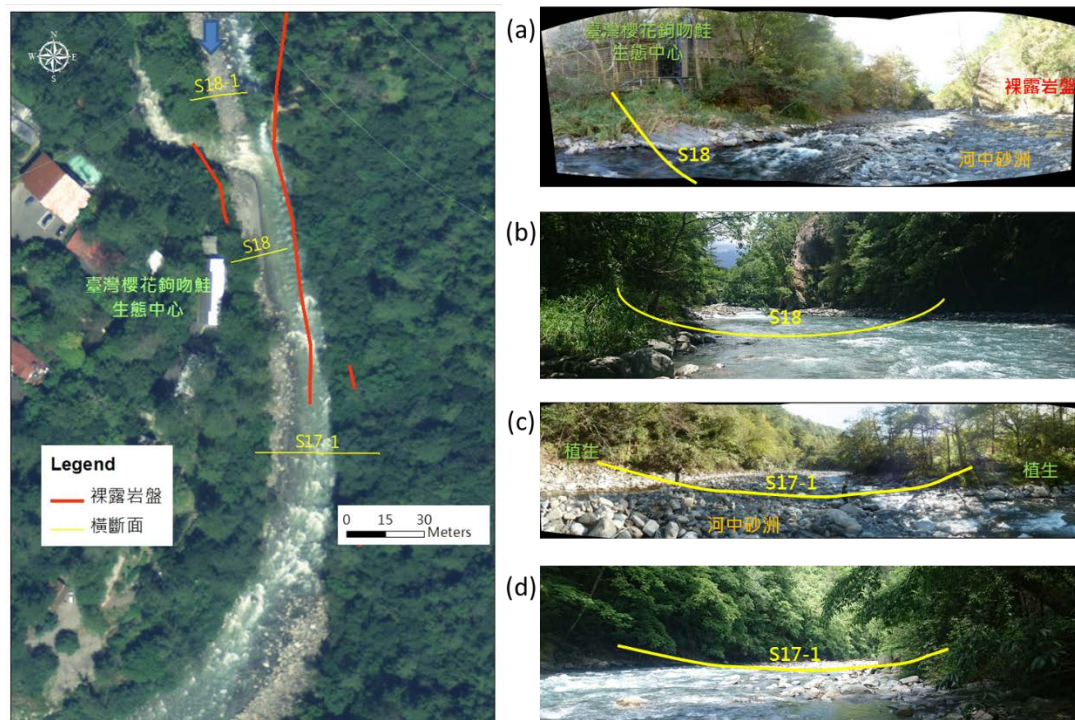


圖 5-8 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心河道環境

(航照底圖為農林航空測量所於 2008 年 9 月 21 日拍攝；現場照片為本研究於 2016 年 11 月 14 日(a、c)及 2017 年 6 月 8 日(b、d)拍攝)

### 1. 縱斷面

從 2010 年到目前為止，本研究團隊共進行 11 次縱斷面量測，主要範圍為上游觀魚台至下游萬壽橋(如圖 5-9)，並根據調查結果推算七家灣溪上下游 1.2 km 不同河段之各時期河道坡度，如表 5-4 所示。

根據 2017 年 11 月 11 日之調查結果顯示，上游溯源侵蝕終點仍停留於上游 800 m 處(S36)，而下游淤積終點則同樣約於壩下游 900 m 處(S17-1)，此結果於 2012 年 8 月蘇拉颱風後至今並無明顯差異(王筱雯，2012)。比較 2016 年 11 月 14 日與 2017 年 11 月 11 日各河段坡度調查結果可知，除上游 200 m 至 400 m 河段坡度變陡外，上游河段坡度皆由陡變緩，可能原因為今年無大型水文事件影響。整體而言，七家灣溪壩上下游 1.2 km 河段範圍內，除壩上游 0 至

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

200 m 內河段之河道坡度在 0.03 至 0.04 間調整外，其於河段之河道坡度皆在 0.02 至 0.03 之間調整。

由 5-19 圖縱斷面結果可知壩體改善後，隨著時間推進，溯源侵蝕逐漸往壩體上游傳遞，壩體下游開始淤積。由 2011 年 6 月 9 日縱斷面調查結果發現壩下沖刷坑已被泥砂填滿，溯源侵蝕終點約略在壩上游 150 m 處，壩上游 0 至 200 m 河段之河道坡度由 0.01 增加至 0.13，壩下游 0 至 200 m 河段之河道坡度則由 0.02 增加至 0.07；米雷颱風後，2011 年 6 月 30 日縱斷面測量結果發現溯源侵蝕終點約略到達壩上游 250 m 處，2012 年 2 月 13 日縱斷面調查結果並沒有太大變化，溯源侵蝕終點仍停留於壩上游約 250 m 處，壩上游及壩下游 0 至 200 m 河段之河道坡度皆減緩至 0.04；2012 年梅雨與泰利颱風後之 2012 年 7 月 22 日縱斷面測量結果顯示溯源侵蝕終點上移，約略到達壩上游 400 m 處 (S30)，壩上游 0 至 400 m 河段之坡度介於 0.02 至 0.03 之間，下游淤積終點亦有變動，約略下移到達壩下游 400 m 處 (S18-6)，壩下游 0 至 400 m 河段之坡度為 0.02；蘇拉颱風後，於 2012 年 9 月 9 日可看出溯源侵蝕終點繼續明顯上移，約略到達壩上游 800 m 處 (S36)，壩上游 0 至 400 m 河段之坡度介於 0.02 至 0.04 之間，下游淤積終點則約略到達壩下游 900 m 處 (S17-1)，壩上游 0 至 400 m 河段之坡度介於 0.02 至 0.03 之間。

表 5-4 各河段河道坡度表

Surveyed date	-1K-200~ 0k-800	0k-800~ 0k-400	0k-400~ 0k-200	0k-200~ 0k+000	0k+000~ 0k+200	0k+200~ 0k+400	0k+400~ 0k+800	0K+800~ 1K+200
2010/04/11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
2011/06/09	No data	No data	No data	0.07	0.13	0.02	0.02	0.02
2011/06/30	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02
2012/02/13	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02
2012/07/22	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
2012/09/09	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02
2013/09/13	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
2014/10/30	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.02
2015/11/24	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
2016/11/14	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03
2017/11/11	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02

同時，本研究團隊亦推算臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道約 100 m 之河段各時期之河道坡度以供後續河道通洪能力計算使用，如表 5-5 所示。由 2017 年坡度調查可知，因 2016 年 11 月 14 日至 2017 年 5 月 18 日期間無較大型水文事件，河道坡度由 0.021 減緩至 0.014，而於兩場梅雨事件與尼莎颱風後，S18 與 S17-1 斷面之主深槽分別下刷 0.2 m 與 0.4 m，河段坡度則由 0.014 增加至 0.022。

由過去調查結果可知，2014 年麥德姆颱風後，S18 斷面(壩下游 801 m)之主深槽高程抬高 0.2 m，S17-1 斷面(壩下游 880 m)之主深槽下刷 0.4 m，該河段坡度由 0.023 增至 0.032；；於 2015 年蘇迪勒及杜鵑颱風後，S18 斷面主深槽下刷 1 m，而 S17-1 斷面之主深槽無明顯沖淤變化，河段坡度由 0.029 減緩至 0.024；2016 年 6 月 3 日調查河道坡度由 0.024 減緩至 0.020，2016 年莫蘭蒂、梅姬颱風事件後，由 2016 年 11 月 14 日調查結果可知河道坡度無明顯變化。



表 5-5 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道坡度

年 度	2012		2013		2014		2015		2016		2017	
日 期	2/13	9/9	6/26	10/24	5/17	10/30	3/20	11/24	6/3	11/14	05/18	11/11
坡 度	0.018	0.026	0.022	0.026	0.023	0.032	0.029	0.024	0.020	0.021	0.014	0.022

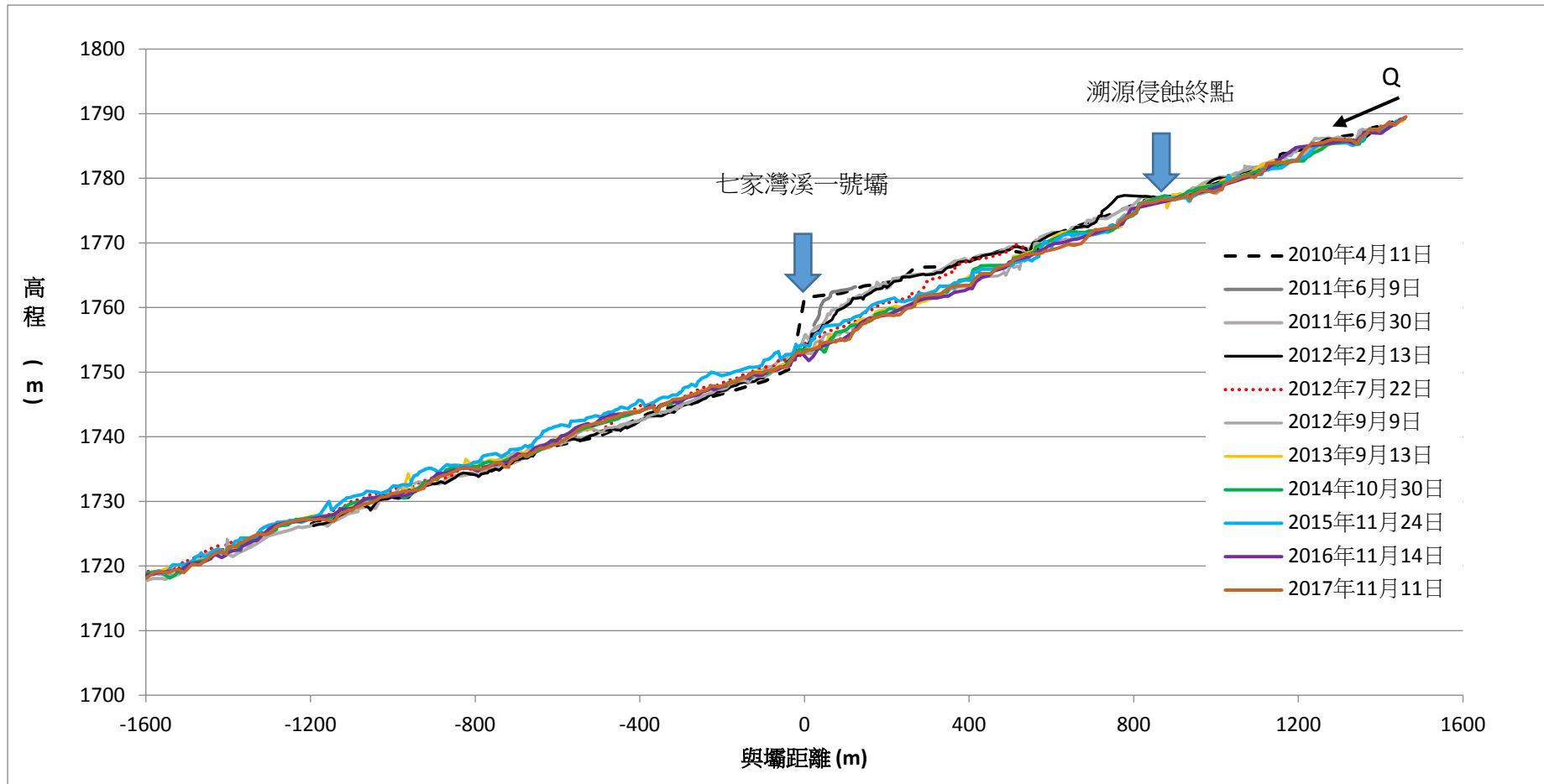


圖 5-9 七家灣溪縱斷面調查成果

## 2. 橫斷面

### (A) S23 斷面

S23 斷面調查及斷面面積變動量結果如圖 5-10、圖 5-13。於 2017 年 5 月 18 日之調查結果顯示，由於距離前次調查期間為枯水期且無較大型之水文事件，因此河道與主深槽改變並不明顯，斷面侵蝕面積僅減少約  $6 \text{ m}^2$ ，由 2017 年 11 月 11 日調查可知，兩場梅雨事件與尼莎颱風並未造成該斷面明顯沖淤，斷面侵蝕面積僅增加約  $2 \text{ m}^2$ 。由 2013 年 10 月 24 日至 2017 年 11 月 11 日各次斷面調查資料顯示，主深槽高程及左岸側向侵蝕並無明顯變化，斷面侵蝕面積於  $401 \text{ m}^2$  至  $412 \text{ m}^2$  區間變動，主深槽位置擺盪不定。

由過去調查結果可知，壩體改善後一個月的米雷颱風造成大量泥砂縱向侵蝕，下刷深度約  $5 \text{ m}$ ，而左右岸邊則僅有些微沖刷。底床繼續下刷至一定程度後，由現地的觀察可知未能被帶走之泥砂已屬大粒徑，導致後續的淘刷情形並未太嚴重。泰利颱風後，除主深槽向下刷深約  $1.1 \text{ m}$  外，河道亦發生側向侵蝕，侵蝕距離右岸約  $7 \text{ m}$ ，左岸約  $2 \text{ m}$ ，斷面侵蝕面積為  $213 \text{ m}^2$ 。蘇拉颱風後，於 2012 年 9 月 11 日量測結果可看出主深槽僅下刷  $0.3 \text{ m}$ ，側向侵蝕致右岸岩盤出露，左岸側向侵蝕  $14 \text{ m}$  引致河岸崩塌，崩塌土方堆積於原主深槽，造成主深槽向右岸移動(王筱雯，2012)，斷面侵蝕面積較前次再增加  $127 \text{ m}^2$ 。蘇力颱風後，2013 年 10 月 24 日調查結果顯示，主深槽往左岸移動  $10 \text{ m}$  且進一步下刷約  $0.6 \text{ m}$ ，原因蘇拉颱風而崩積於左岸的土方亦被帶往下游，斷面侵蝕面積較前次又再增加  $62 \text{ m}^2$ 。於 2014 年 10 月 30 日量測結果，可知麥德姆颱風並未造成該斷面明顯沖淤。蘇迪勒颱風及杜鵑颱風後，2015 年 11 月 24 日調查結果顯示，主深槽往右岸移動  $20 \text{ m}$ ，則距右岸  $25 \text{ m}$  至  $45 \text{ m}$  處形成淤積，最大淤積深度約為  $2 \text{ m}$ 。2016 年 6 月 3 日及 11 月 14 日兩次調查期間經歷了莫蘭蒂颱風及梅姬颱風，但結果顯示河道沖淤互現。

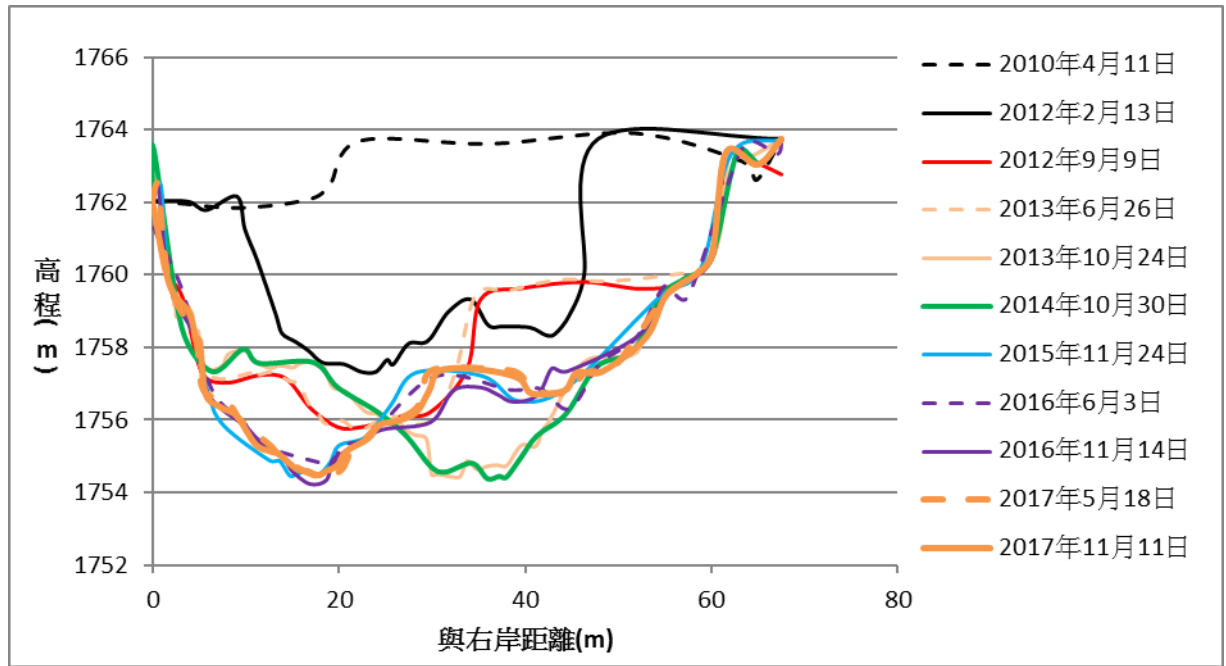


圖 5-10 S23 斷面(OK+48)

(B) S18 斷面

S18 斷面調查及斷面面積變動量結果如圖 5-11、圖 5-13。2017 年 5 月 18 日之調查結果顯示，由於離前次測量無較大型之水文事件，主深槽位置改變並不明顯，但河道整體呈現些微淤積狀態，斷面淤積面積些微由 10 m<sup>2</sup> 增加至 13 m<sup>2</sup>，由 2017 年 11 月 11 日調查結果顯示，於兩場梅雨事件與尼莎颱風後，河道距右岸 20 m 至 35 m 處發生河道沖刷，最大沖刷深度約 0.7 m，同時左岸河岸亦發生 0.8 m 側向侵蝕，斷面淤積面積由 13 m<sup>2</sup> 減少至 6 m<sup>2</sup>。由 2012 年 9 月 9 日至 2017 年 11 月 11 日各次斷面調查資料顯示，斷面淤積面積於 6 m<sup>2</sup> 至 39 m<sup>2</sup> 區間變動。

由過去調查結果可知，2010 年 4 月 11 日斷面量測因量測密度不足，雖無法充分描述河道形狀，但與壩體改善後(2012 年 2 月 13 日)比較，兩次量測主深槽高程結果變化不明顯，可知上游河道下切尚未造成此處淤積，直至 2012 年梅雨、泰利颱風及蘇拉颱風後造成下游明顯淤積，由 2012 年 9 月 9 日量測結果可知主深槽抬高約 1.4 m，最大淤積深度約為 2 m，並形成河中砂洲，斷面淤積面積為 36 m<sup>2</sup>。2013 年蘇力颱風前後，主深槽高程無明顯變化，河中砂洲先些微淤積(2013

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

年 6 月 26 日)後沖刷(2013 年 10 月 24 日)，最大沖刷深度約 0.9 m，斷面淤積面積由 39 m<sup>2</sup> 減少至 30 m<sup>2</sup>。2014 年 5 月 17 日調查與前次量測結果比較無明顯沖淤變化。麥德姆颱風後，由 2014 年 10 月 30 日量測結果可知主深槽抬高約 0.2 m，斷面淤積面積為 26 m<sup>2</sup>。2015 年 3 月 25 日調查結果與前次測量結果可知主深槽抬升約 0.1 m，最大淤積深度為 0.5 m，整體而言，河道呈現淤積狀態。蘇迪勒颱風及杜鵑颱風後，由 2015 年 11 月 24 日調查結果得知，主深槽下刷約 1 m，河道呈現沖刷狀態，斷面淤積面積為 8 m<sup>2</sup>。2016 年 6 月 3 日調查結果顯示河道距右岸 18 m 至 26 m 處些微淤積，最大淤積深度約 0.3 m。莫蘭蒂颱風及梅姬颱風後，2016 年 11 月 14 日調查結果顯示，前次調查的淤積的泥砂已被帶走，主深槽的位置並無太大的變化，左岸(距右岸約 33 m 處)局部下刷約 0.5 m，斷面淤積面積為 10 m<sup>2</sup>。

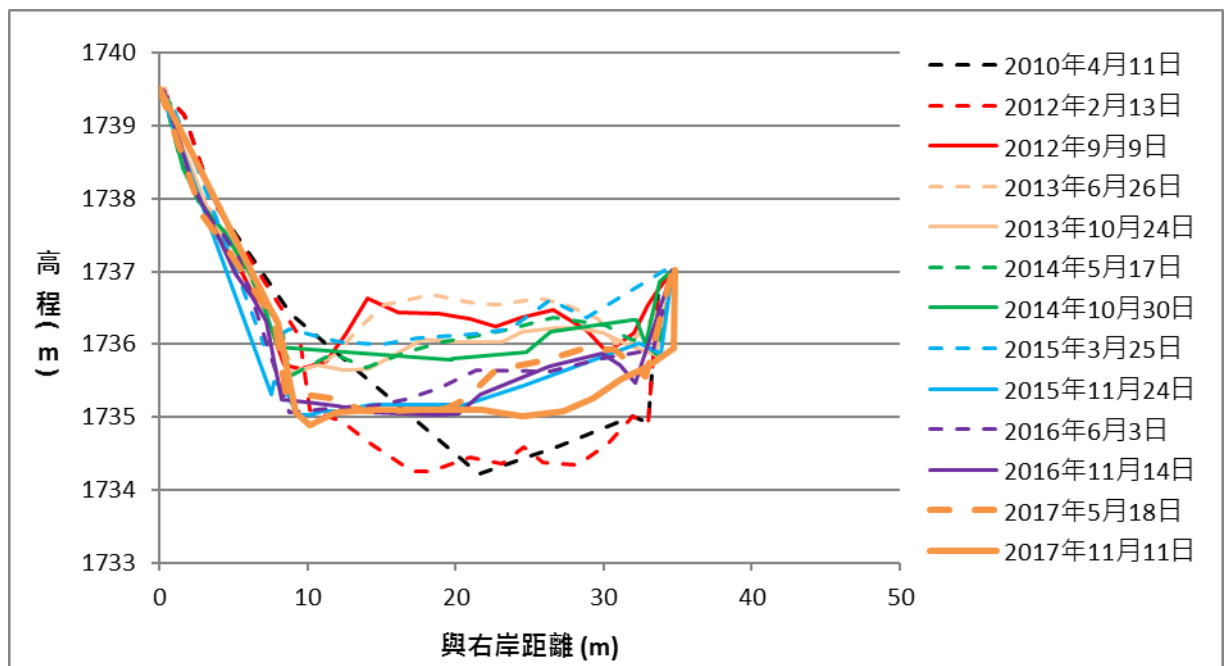


圖 5-11 S18 斷面(OK-801)

(C) S17-1 斷面

S17-1 斷面調查及斷面面積變動量結果如圖 5-12、圖 5-13。2017 年 5 月 18 日之調查結果顯示，由於離前次測量無較大型水文事件，主深槽位置改變並不明顯，但整體河道抬高約 0.2 m，整體呈現淤積狀態，斷面淤積面積由 24 m<sup>2</sup> 增加至 28 m<sup>2</sup>，由 2017 年 11 月 11 日調查結果顯示，兩場梅雨事件與尼莎颱風後，河道距右岸 6 m 至 39 m 處發生河道沖刷，最大沖刷深度約 0.7 m，斷面淤積面積由 28 m<sup>2</sup> 減少至 13 m<sup>2</sup>。由 2012 年 9 月 9 日至 2017 年 11 月 11 日各次斷面調查資料顯示，斷面淤積面積於 13 m<sup>2</sup> 至 44 m<sup>2</sup> 區間變動。

由過去調查結果可知，2012 年梅雨、泰利颱風及蘇拉颱風造成此處明顯淤積，由 2012 年 9 月 9 日量測結果可知主深槽抬高約 0.8 m，最大淤積深度約為 3 m，造成原主深槽位置形成河中砂洲，主深槽由距右岸 28 m 移至距右岸 12 m 處，斷面淤積面積為 36 m<sup>2</sup>。2013 年蘇力颱風前(2013 年 6 月 26 日)調查結果顯示河道沖淤互現，蘇力颱風後(2013 年 10 月 24 日)，河道有沖刷情形發生，主深槽下刷約 0.3 m，河中砂洲最大沖刷深度約 2 m，斷面淤積面積由 44 m<sup>2</sup> 減少至 23 m<sup>2</sup>。2014 年 5 月 17 日調查結果與前次量測結果比較無明顯沖淤變化。麥德姆颱風後，由 2014 年 10 月 30 日量測結果可知距右岸 20 m 至 26 m 之河中砂洲並無明顯沖淤變化，河中砂洲兩側河槽則有沖刷情形發生，主深槽下刷約 0.4 m，距右岸 26 m 至 43 m 河槽之最大沖刷深度約 0.7 m。2015 年 3 月 20 日調查結果與前次測量結果比較，於右岸河道有淤積狀況，主深槽約抬升 0.3 m，最大淤積深度約 0.8 m。蘇迪勒颱風及杜鵑颱風後，由 2015 年 11 月 24 日調查結果得知，距右岸 20 m 至 26 m 之河中沙洲有明顯沖刷現象，最大沖刷深度約為 0.5 m，距右岸 30 m 至 36 m 處有明顯淤積現象，最大淤積深度為 0.6 m，斷面淤積面積由 27 m<sup>2</sup> 減少至 23 m<sup>2</sup>。由 2016 年 6 月 3 日與 2015 年 11 月 24 日調查結果比較，距右岸 25 m 至 30 m 間下刷約 0.2 m。莫蘭蒂颱風及梅姬颱風後，2016 年 11 月 14 日調查結果顯示，主深槽位置並沒有太大的改變，以沖淤情況來看，距右岸 15 m 至

18 m 處和 28 m 至 36 m 處有淤積的情況，淤積的平均深度約為 0.3 m；距右岸 21 m 至 23 m 處有沖刷的現象，沖刷深度約為 0.4 m，斷面淤積面積由 33 m<sup>2</sup> 減少至 24 m<sup>2</sup>。

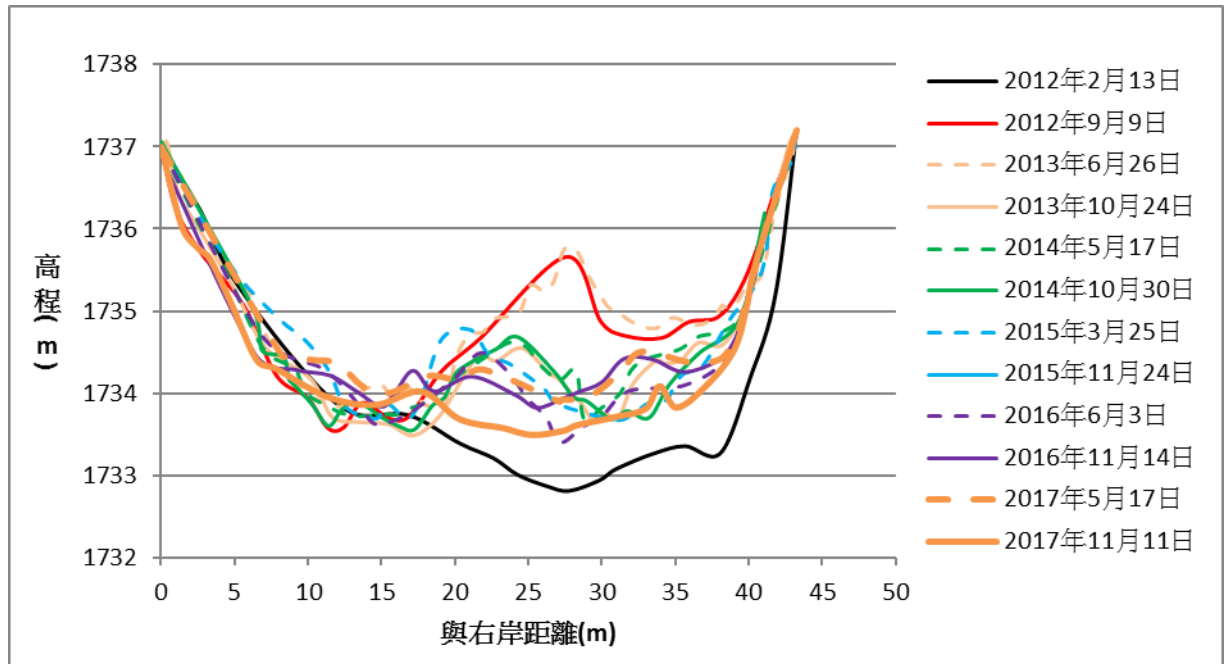


圖 5-12 S17-1 斷面(OK-880)

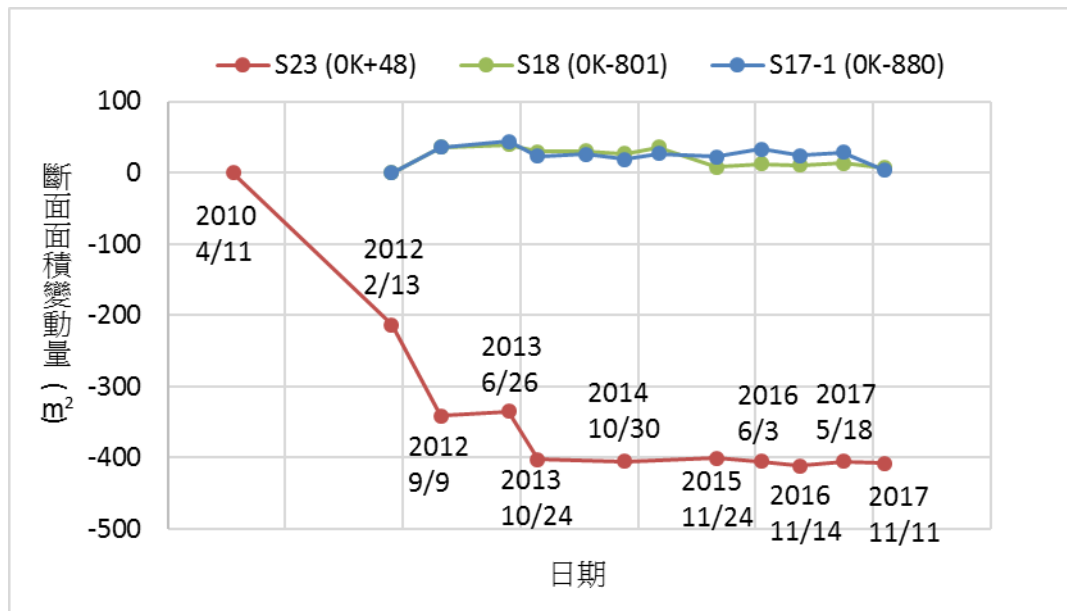


圖 5-13 斷面面積變動量 (縱軸正向代表淤積；負向代表沖刷)

(二) 河道通洪能力

本計畫利用七家灣流量站 1981 年至 2009 年各年年最大瞬時流量資料進行之流量頻率分析，並搭配集水區面積權重法推求得臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心各重現期距對應之流量。現地流量可透過曼寧公式(如式 2)來估算，式中， $Q$  為流量(cms)， $n$  為河道糙度， $A$  為通水面積( $m^2$ )， $R$  為水力半徑(m)， $S$  為水力坡降。其中河道糙度( $n$  值)可能因河道幾何、水位、流量、粒徑組成、沖淤變化、河道坡度而變，通水面積與水力半徑則隨斷面變化與水位高低而改變。在颱風期間，河床動態調整之行為複雜，因此無法確定河床劇烈變動下河道糙度、通水面積與水力半徑變化，目前尚無研究能準確預測或驗證動床河道於洪水期間之河道最大之通洪流量(或稱過水容量(Water carrying capacity)，係指斷面滿岸時在單位時間內能通過之最大流量)，係為洪水期間流量估算之限制。本團隊在經費有限的情況下假設河道為定床，採用王筱雯(2014)檢算臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之河道糙度(0.056)，以相同之標準來檢視不同時期河道之通洪能力，以供管理單位做參考。本計畫針對斷面調查結果，進一步藉由公式(式 2)計算 S18 與 S17-1 兩處斷面最大通洪流量，以探討臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之通洪能力，兩斷面不同時期最大可通洪流量計算結果如圖 5-14。

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (\text{式 2})$$

本團隊於 2017 年 5 月 18 日調查，結果顯示 S18 斷面之可通洪流量從 753 cms 下降至 572 cms，S17-1 斷面之可通洪流量從 470 cms 下降至 363 cms，由斷面測量結果可知可通洪面積下降，且河段坡度由 0.021 下降至 0.014，因此通洪能力下降。於兩場梅雨事件與尼莎颱風後，S18 和 S17-1 斷面可通洪流量分別為 779 cms 和 578 cms，由 2017 年 11 月 11 日的斷面調查結果顯示，S18 與 S17-1 斷面之可通洪面積增加，以及河段之河道坡度增加，估算兩斷面的通洪能力皆上升。本團隊以河道通洪能力檢算評估臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道淹水潛勢，目前河道通洪能力可達 100 年及 50 年重現期距流量之颱風事件。依據 2013 年至



2017 年之通洪能力監測結果，隨著水文事件的發生，將帶走汛期前所淤積的泥砂，將使得通洪能力再度提高。

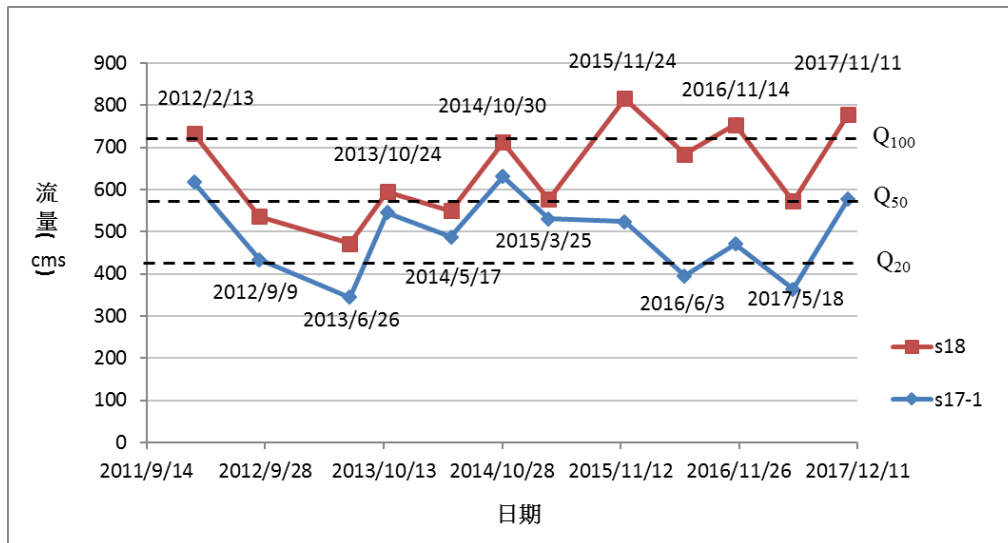


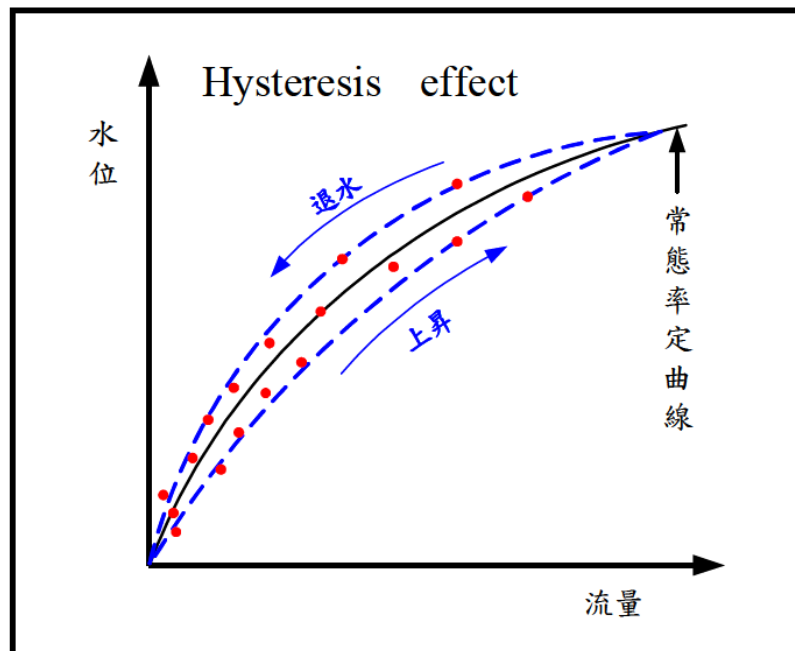
圖 5-14 斷面最大可通洪流量

由過去調查結果可知，王筱雯(2012)以斷面調查結果估算 2010 年 4 月 11 日至 2012 年 2 月 13 日期間庫區總計約 20,000 m<sup>3</sup> 侵蝕土方量被帶往下游，於臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河段並未發現明顯淤積，由圖 5-13 可知，2012 年 2 月 13 日 S18 與 S17-1 斷面之最大可通洪流量分別為 732 cms 及 617 cms。根據 2012 年 9 月 9 日結果可知，S18 與 S17-1 斷面之最大可通洪流量分別減少至 537 cms 及 433 cms，主要原因為梅雨、泰利颱風及蘇拉颱風造成庫區總計約 125,000 m<sup>3</sup> 侵蝕土方量被帶往下游，並造成下游河道明顯淤積。隨著泥砂持續淤積，通洪面積持續減小，河段坡度由 0.026 降至 0.022，由 2013 年 6 月 26 日結果顯示，S18 與 S17-1 斷面之最大可通洪流量分別再減少至 472 cms 及 345 cms。然後於 2013 年 10 月 24 日結果發現 S18 與 S17-1 斷面之最大可通洪流量分別增加至 594 cms 及 545 cms，進一步比對王筱雯(2013)估算近 5 年重現期距蘇力颱風、潭美颱風造成庫區總計約 10,000 m<sup>3</sup> 侵蝕土方量被帶往下游，推估應是由於上游泥砂來源不足，而使洪水將原本淤積在下游河道中的泥砂帶往更下游，使通洪面積增加。2014 年 5 月 17 日麥德姆颱風前(2014 年 5 月 17 日)，S18 與 S17-1 可通洪流量分

別減少至 550 cms 及 488 cms，由斷面調查結果可知兩次調查期間斷面雖無明顯沖淤變化，河段坡度由 0.026 降至 0.023，估算後得知斷面通洪能力降低。麥德姆颱風後(2014 年 10 月 30 日)，S18 與 S17-1 可通洪流量分別增加至 712 cms 及 631 cms，由斷面調查結果可知兩次調查期間斷面雖無明顯沖淤變化，河段坡度由 0.023 升至 0.032，估算後得知斷面通洪能力提高。根據團隊於 2015 年 3 月 25 日調查，結果顯示 S18 與 S17-1 可通洪流量減至 577 cms 及 531 cms，由斷面測量結果可知 S18 及 S17-1 斷面除主深槽均抬升 0.1 m 及 0.2 m 外，河段坡度從 0.032 降至 0.029，估算後得知通洪斷面能力下降。於 2015 年蘇迪勒颱風及杜鵑颱風後，S18 與 S17-1 可通洪流量分別為 816 cms 及 524 cms，由 2015 年 11 月 24 日斷面調查結果顯示，S18 斷面主深槽下刷約 1 m，S17-1 斷面為沖淤互現，主深槽無明顯沖淤變化，河道坡度由 0.029 降至 0.024，估算後得知 S18 斷面通洪能力上升，而 S17 斷面通洪能力無明顯增減。根據團隊於 2016 年 6 月 3 日調查，結果顯示 S18 斷面之可通洪流量從 816 cms 下降至 684 cms，S17 之可通洪流量在 524 cms 減少至 396 cms，由斷面測量結果可知 S18 斷面距右岸 14 m 至 26 m 間有局部淤積情形，最大淤積深度約 0.3 m，S17-1 斷面主深槽些微下刷約 0.1 m，S18 與 S17-1 斷面有些微沖於情形發生，河段坡度由 0.024 降至 0.020，估算後得知 S18 與 S17-1 斷面通洪能力下降。於莫蘭蒂颱風及梅姬颱風後，S18 和 S17-1 斷面可通洪流量分別為 753 cms 和 470 cms，由 2016 年 11 月 14 日的斷面調查結果顯示，S18 與 S17-1 斷面之可通洪面積增加，河道坡度無明顯變化，估算後得知兩斷面的通洪能力皆上升。

(三) 流量推估

渠道因楔型蓄水(Wedge storage)效應之影響，洪水水位上升及下降時其與流量間成一束圈(loop)關係(如圖 5-15)，此即水位-流量之遲滯現象(Hysteresis effect)。對同一流量而言，洪水水位下降階段之水位較上升時期之水位為高，倘依發生次序觀之，河川流速最早達到最大值，再者流量，水位則最後達到最大值。一般單站式水位站多以底床坡度推估流量，如欲克服楔型蓄水效應之影響，可設置輔助水位站方式取得上下游水面坡降，根據水力學理論由上下游水位差及河道斷面幾何及阻力特性以坡度面積法計算洪水流量。



(朱木壽，2010)

圖 5-15 洪水期間水位-流量之遲滯現象示意圖

由於目前七家灣溪僅有萬壽橋水位測站一站，並無上下游之水位輔站，本團隊藉由萬壽橋水文測站之水位紀錄與斷面調查資料，推求各水位對應之通水面積(A)，搭配萬壽橋水文測站之表面流速資料( $U_s$ )，即可進一步估算各時間之流量( $Q=A*U_s$ )。在現地環境條件受限的情況下，本團隊盡可能的藉由現地調查來校正數據，以提高流量推估的可信度。

一般而言，流量之推估應以平均流速做計算，已知表面流速( $U_s$ )與平均流速( $U$ )有一定之關係，為提高水位測站之流量推估之準確度，可應用 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)或 Sontek Flow Tracker Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) 或一維流速儀(Global Water Flow Probe FP111)所測得之平均流速與微波雷達表面流速儀所測得之表面流速做比較，進一步分析表面流速( $U_s$ )與平均流速( $U$ )得一校正係數( $a$ )後，校正之表面流速( $a*U_s$ )即可做為流量推估使用，推估流程如圖 5-16。

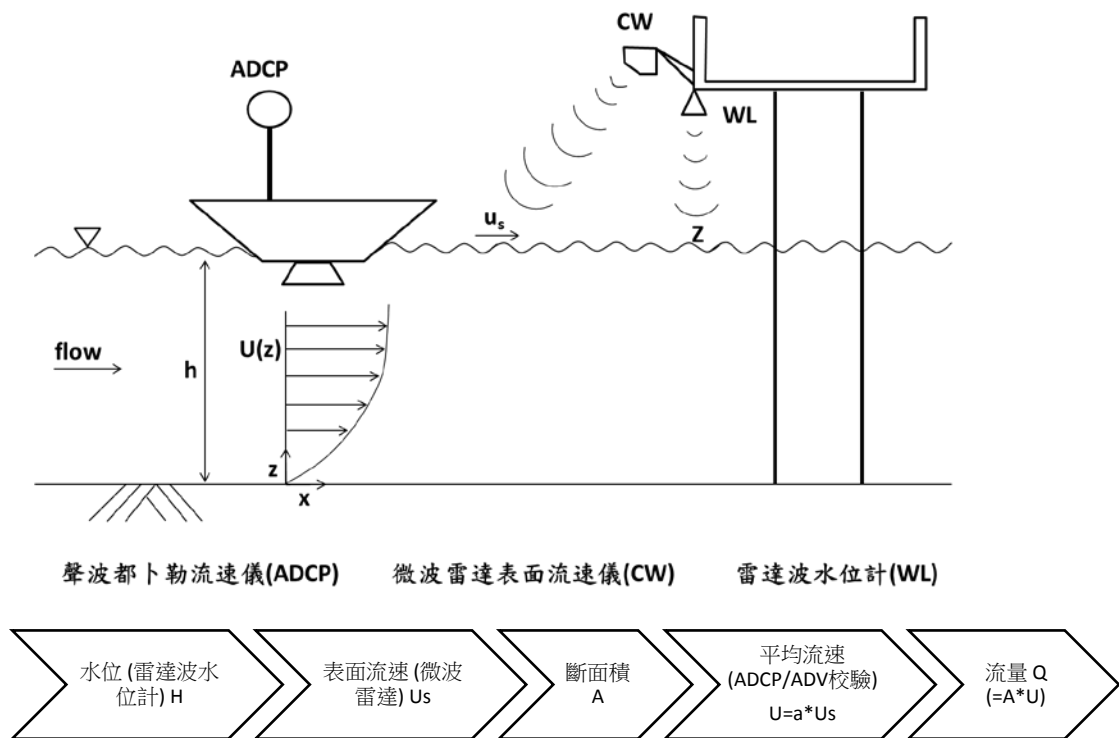


圖 5-16 流量推估流程

由於測站設置於動床斷面，斷面形狀將隨時間而改變，因此不同時期之斷面在相同水位下，通水面積或水理條件不盡相同。本團隊為得知儀器各時間點所量測之水位值所對應之通水面積( $A$ )，於新設水位測站下方設置一基準斷面做為通水面積推算使用，並且將視狀況不定期更新斷面資料以及校正表面流速與平均流速之關係，以因應變動的河道。本團隊根據 2017 年 5 月 18 日、8 月 22 日、9 月 11 日、10 月 4 日及 10 月 28 日之斷面調查結果以 MATLAB(MATrix LABoratory,

版本 R2016a)計算不同水位下所對應之通水面積，並進一步對應至水位計各時間點所量測之水位值。流速校正方面，本團隊目前使用一維流速儀進行流速水深穿越線調查，於施測斷面以每隔一公尺之距離，量測水深及流速(採一點法，量測 0.6 倍水深處之流速)，得知 2017 年 6 月 27 日 11:00 時以平均斷面法推算之通水面積與流量分別為 8.3 m<sup>2</sup> 與 10.39 cms，得平均流速為 1.25 m/s，而此時流速計所記錄之表面流速為 1.40 m/s，進一步比較表面流速( $U_s$ )與實測之平均流速( $U$ )後，得校正係數( $a$ )為 0.89。在求出校正係數( $a$ )後，校正各時間點之表面流速( $a*U_s$ )，接著再乘上通水面積( $A$ )，即可得到各時間點之流量推估結果( $Q$ )；重複上法，於 8 月 22 日及 10 月 28 日流速調查之校正係數( $a$ )分別為 0.74 與 0.83，三次校正係數分別用於校正量測當時至上次量測時間之流速。本團隊 2017 年 1 月 11 日到 2017 年 11 月 11 日流量推估成果如圖 5-17，可知 2017 年 6 月 2 日梅雨事件最大流量為 140 cms，約為 2 年重現期距流量；2017 年 7 月 29 日尼莎颱風最大流量為 123 cms，近 2 年重現期距流量。

本團隊進一步藉由 2011 年至 2015 年各事件之萬壽橋水位與台灣電力公司流量站七家灣溪流量(七家灣與有勝溪流量站之流量資料差值)以及本團隊 2017 年 6 月 2 日梅雨、7 月 29 日尼莎颱風、10 月 13 日豪雨之水位及流量資料(圖 5-18)，建立萬壽橋水文測站之水位流量率定曲線(如式 3)，可供管理單位即時推估使用，惟現有資料筆數太少，流量推估之水位適用範圍為 1.19~4.75 m。

$$Q = 61.287(13.05 - H)^2 - 220.68(13.05 - H) + 221 \quad (\text{式 } 3)$$

其中， $Q$  為七家灣溪流量， $H$  為萬壽橋水位站儀器水位記錄值(雲端即時資料 <http://wra.procal-tech.com/Login.aspx?ReturnUrl=%2f>)。

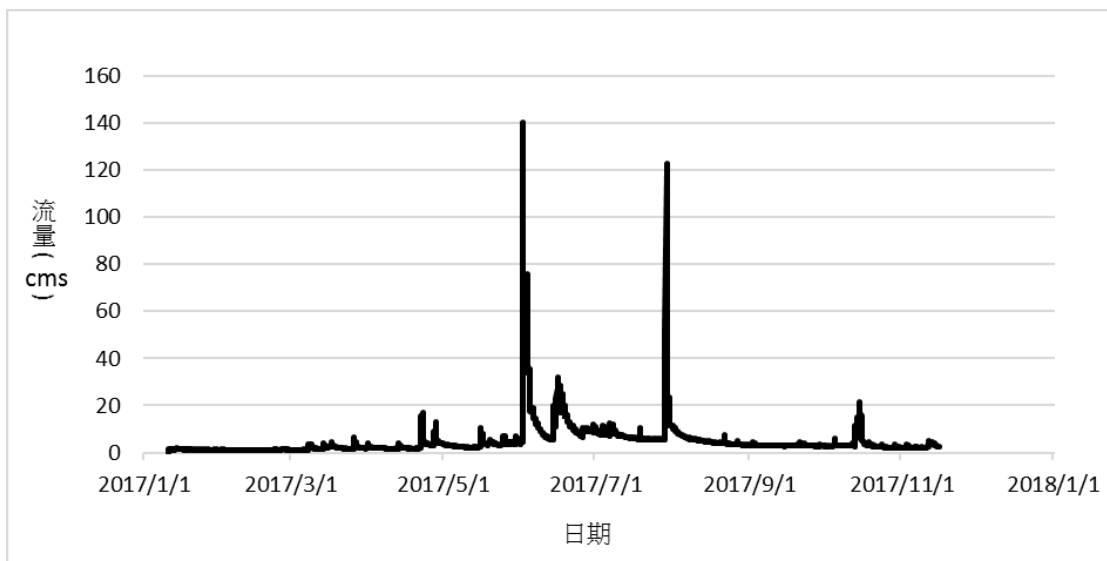


圖 5-17 流量推估成果

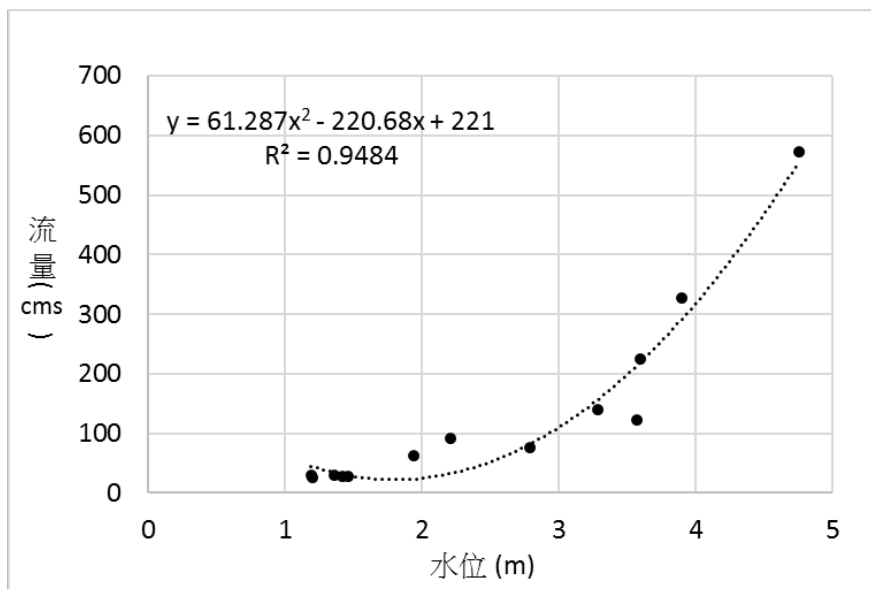
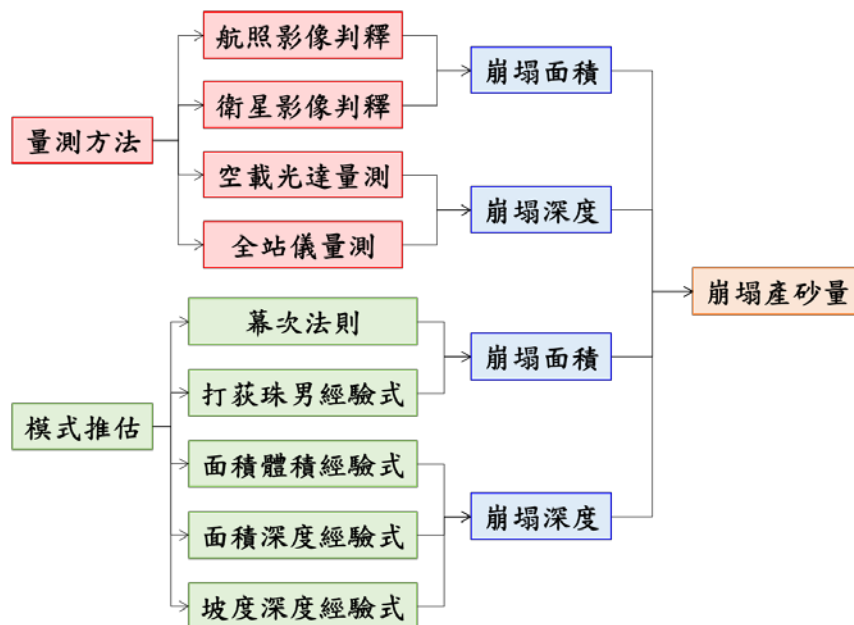


圖 5-18 2011-2017 年各事件尖峰流量-水位率定曲線圖

(四) 崩塌地調查

崩塌地調查可分為量測方法及模式推估，並可細分九項方法可詳圖 5-19。一般而言，崩塌地面積可依航照圖及衛星影像來進行判釋，但航照圖或影像圖判釋較不即時，費用也相對高，但其優點是影像在經數道影像正射處理程序後之成果精確；而崩塌深度，除空載光達及全站儀外(表 5-3)，也可利用崩塌深度與邊坡坡度(詹勳全等，2015)或滑動面積(劉哲欣等，2011)等相關經驗公式來進行推估，兩種方法各有其優缺點，空載光達費用高昂，且須有地形變化前之資料方可進行推算，全站儀量測可能會面臨場地限制之問題，而經驗公式部分則有迅速及便宜等優點，但相對上述兩項量測方法而言誤差較大，故可依經費及目的等不同需求來進行崩塌地推估。

本計畫因無編列相關經費用進行精確之崩塌土方量調查，故本研究僅依空拍成果來套繪崩塌地範圍，並進行不同年度之崩塌地面積比較，崩塌量部分因無相關資料輔助計算，僅蒐集相關經驗公式提供參考，詳表 5-6 及 5-7。



(TIIWE, 2011)

圖 5-19 崩塌地泥砂量推估方法與模式

表 5-6 邊坡坡度與崩塌深度關係對照表 (詹勳全等, 2015)

坡面坡度 (度)	Khazai and Sitar (2000)	歐陽元淳 (2003)	國家災害科技研究中心 (2004)
<30	2.0	0.9	5.0
30~40	1.5	0.9	4.0
40~60	1.0	0.9	3.0
>60	0.5	0.9	2.0

表 5-7 滑動面積與代表性深度對照表 (劉哲欣等, 2011)

滑動面積 (ha)	平均代表深度 (m)
0-0.1	1
0.1-1	2
1-10	5
>10	10

延續王筱雯(2016)之調查，本團隊於 2017 年 10 月 28 日再次以空拍方式進行崩塌地調查，並將航拍成果進行 ArcGIS 套繪以了解壩體改善後河道演變河岸舊有崩塌之演變與是否有新生成之崩塌。由 2017 年 10 月校正後之空拍影像成果(圖 5-20)顯示，壩上游 250 m 處之崩塌面積由 2016 年 11 月之 2,662 m<sup>2</sup> 更進一步降至 1,426 m<sup>2</sup>，其結果顯示崩塌面積呈現縮小趨勢，2010 年至 2017 年崩塌地位置及變遷情形如表 5-8 所示。另一方面，由空拍影像成果之河道邊界描繪可知，本年度之河道無大規模之變化，僅於斷面 S38 處有稍微不同，該處 2016 年之左岸河道分支並不明顯，2017 年度之成果則明顯有水；另依整體而言，河道內之既有植被之密度皆優於 2016 年 11 月之狀況。

王筱雯(2010；2012)曾於現地進行崩塌地調查，包含河岸及邊坡崩塌位置之確認、崩塌範圍之界定紀錄等，調查範圍涵蓋七家灣溪一號壩上下游各 1 km 之區域。根據王筱雯(2012)調查結果，一號壩上游 500 m 及下游 200 m 內共 7 處崩



106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

塌；其中上游 115 m、250 m、310 m 及 425 m 等四處崩塌地為 2010 年(王筱雯，2010)即已調查之舊有崩塌地，因強降雨而持續崩塌，使得面積增大，其餘三處皆為新生崩塌地，2012 年崩塌面積統計約為 11,712 m<sup>2</sup>。

王筱雯(2016)航拍成果指出，2012 年調查之 7 處崩塌僅剩一處(上游 250 m 處)仍有崩塌情形，由於並無新增之崩塌且植生逐漸回復而使裸露地有逐年減少之趨勢；進一步分析上游 250 m 處崩塌面積變化，結果顯示 2016 年 8 月該處崩塌面積由 2012 年 9 月調查之 5,990 m<sup>2</sup> 降至 3,180 m<sup>2</sup>，而 2016 年 11 月之估算顯示崩塌面積由 3,180 m<sup>2</sup> 降至 2,662 m<sup>2</sup>。

表 5-8 崩塌地面積變遷

與壩距離 (m)	崩塌面積 (m <sup>2</sup> )					備註
	2010	2012/9	2016/8	2016/11	2017/10	
0K+425	1,399	2,181				上游左岸邊坡
0K+370	671					上游左岸邊坡
0K+340		890				上游左岸邊坡
0K+310	458	579				上游左岸邊坡
0K+250	877	5,990	3,180	2,662	1,426	上游左岸邊坡
0K+115	447	1,878				上游左岸邊坡
0K-50		155				下游左岸邊坡
0K-150		39				下游左岸邊坡

(王筱雯，2010；2012；2015；2016)

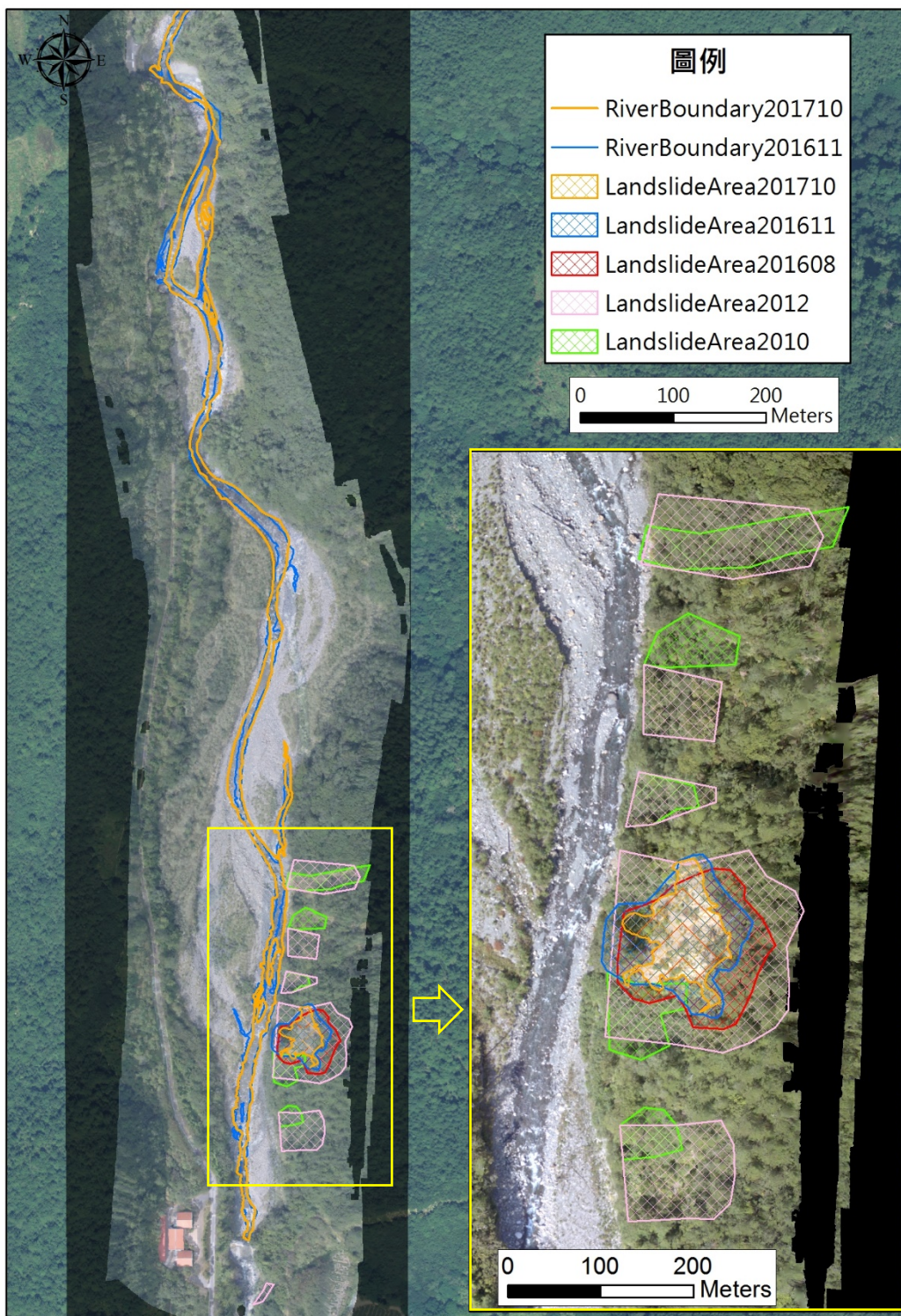


圖 5-20 2017 年崩塌地套繪成果



## 第六章 監測指標

本委託辦理計畫依據七家灣溪一號壩壩體改善後監測之過去經驗(王筱雯 2011; 2012 2013; 2014; 2015; 2016)及本年度(2017)水文影像監測，針對壩體改善後河道環境可能面臨之衝擊，以事件、年、長期(多年)之不同時間尺度及河道內水工設施、基礎設施等保全對象切入，規劃七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之監測指標(表 6-1)與作業方式(表 6-2)。本計畫根據王筱雯(2016)所提出之監測指標與作業方式，於今年(2017)進行七家灣溪水文影像定點監測與現地監測，由監測結果得知今年七家灣溪最大之水文事件為 6 月 2 日梅雨事件(兩年重現期距流量)，且並未對河道環境造成不可預期之影響，顯示王筱雯(2016)所提出之監測指標(表 6-1)與作業方式(表 6-2)對河道環境變遷能有一定之掌握，因此尚無調整之必要。

河道變遷監測工作項目包含河道坡度、侵蝕土方量變化、側向侵蝕、崩塌地面積變遷、物理棲地類型變遷、溯源侵蝕終點遠離壩上游 800 m、坡地植被裸露及壩基淘空等指標，藉由各指標來評估河道環境變遷是否危及保全區域(道路、房屋、河道內水工設施)之可能，若有，視現地狀況及必要性擬定對策，如溯源侵蝕終點遠離壩上游 800 m，可能危害上游殘餘壩體，建議採取之應變措施為延長縱斷面之調查範圍並針對上游防砂壩進行壩體安全調查。

淹水潛勢監測工作項目包含保全區域之可通洪流量低於 20 年重現期距流量、24 小時內累積雨量大於 300 mm、萬壽橋水位站即時水位大於 4.75 m、河道變遷歷程等指標，其中 20 年可通洪流量與萬壽橋水位值是根據壩體改善至今有記錄之最大水文事件蘇拉颱風訂定，雨量警戒值訂定則是根據過去記錄之七家灣溪重要歷史水文事件：2004 年艾利颱風(>Q10)、2005 年海棠颱風(Q50)及 2012 年蘇拉颱風(Q20)。艾利颱風，前 24 小時累積降雨量為 332 mm，尖峰流量為 510 cms；海棠颱風前 24 小時累積降雨量為 338 mm，尖峰流量 844cms；蘇拉颱風前

24 小時累積降雨量為 355.5 mm，尖峰流量 573 cms。由這三場歷史事件可知，24 小時內累積降雨高於 300 mm，有高機率發生 10 年以上洪水事件。另根據行政院農業委員會水土保持局公布之土石流警戒基準值簡表 (<http://246.swcb.gov.tw/Doc/DebrisAlertValueA4.jpg>)，台中市和平區之警戒值亦為 300 mm，未來台灣櫻花鉤吻鮭生態中心之緊急狀況亦可參考土石流防災資訊網之警戒資訊(<http://246.swcb.gov.tw/>)。於汛期前(4~6 月)透過淹水潛勢監測，掌握河段坡度及斷面可通洪面積狀況，如河道通洪流量低於 20 年重現期距流量，可以清淤方式調整河道通洪面積及河段坡度，惟考慮重型機具可及性及重機械擾動影響，建議優先處理 S18 至 S17-1 河段間河中砂洲，可將環境衝擊降至最低。若 24 小時累積降雨量達 300 mm 以上，考量滿岸流量溢流之風險，視影響範圍決定人員疏散與交通管制，以及將生態中心前之野放生態池中之臺灣櫻花鉤吻鮭移置安全地方。

本委託辦理計畫僅提出監測指標，緊急應變措施仍需管理單位研擬並落實。未來棲地改善(壩體改善)將成為臺灣櫻花鉤吻鮭延續族群生存的重要工作，然而壩體改善期間可能引起短期的環境衝擊，包含了流量的瞬間改變、下游深潭為泥砂填滿、或增加水的濁度，與由於重機械的擾動所產生的影響，這些乃屬於短期暫時的衝擊，但仍需要選擇避開生物物種的關鍵時期，且需注意施工時間不要太長，並佐以泥砂監測，並可視必要性將下游鮭魚捕捉移置他處以確保其不受傷害(王筱雯，2010)。由於生態環境的不確定性與變動，在進行壩體改善工作時，需要考慮其評估階段的不確定性，泥砂方面的不確定性包含(1)泥砂運移與水文事件的關係 (2)泥砂侵蝕率 (3)侵蝕土方量；河相方面的不確定性包含(1)泥砂堆積位置 (2)掩埋下游潭瀨等水域型態 (3)保全區域洪災潛勢提高；生態方面的不確定性包含(1)下游河道粒徑組成的改變 (2)細粒料填縫。適應性管理(Adaptive Management)是面對具有不確定性之系統時，藉由長期監測的方式，動態性視實際狀況調整管理措施。由於生態環境雖具有知識與原則為科學基礎，但生態系統

是動態且經常變化的，因此，任何的管理或人工施作方法皆應視為假設，有待進一步的研究與加以檢驗，並據以隨時修正調整管理做法，適應性管理的操作極為必要手段(王筱雯，2010)。

表 6-1 七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之監測指標

時間尺度 (調查頻度)	颱洪事件 (每年多次)	年 (每年至少一次)	長期 (多年一次或每年一次)
河道內	<p><u>潰壩:</u></p> <p>1. 壩基淘空 ★★★</p> <p><u>泥砂衝擊:</u></p> <p>1. 含砂濃度影響時間 ★★★</p>	<p><u>潰壩潛勢:</u></p> <p>1. 溯源侵蝕終點 遠離壩上游 800 m ★★★</p> <p>2. 壩體安全調查 ★★★</p>	<p><u>河道變遷:</u></p> <p>1. 側向侵蝕 ★★</p> <p>2. 侵蝕土方量變化 ★★</p> <p>3. 泥砂動態(濁度) ★★</p>
基礎設施	<p><u>洪災預警:</u></p> <p>1. 24 小時內累積雨量大於 300 mm ★★★</p> <p>2. 萬壽橋水位站即時水位大於 4.75 m ★★★</p> <p><u>保全區域安全:</u></p> <p>1. 現場觀察是否有側向侵蝕、崩塌現象 ★★★</p>	<p><u>淹水潛勢:</u></p> <p>1. 保全區域之可通洪流量低於 20 年重現期距流量 ★★★</p> <p><u>崩塌潛勢:</u></p> <p>1. 坡地植被裸露 ★★★</p>	<p>4. 崩塌地變遷 ★</p> <p>5. 河道坡度 ★</p> <p>6. 河床質粒徑 ★</p> <p>7. 物理性棲地變遷(包含流況與河床質粒徑) ★</p>

表 6-2 七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之作業方式(1/2)

監測工作項目	指標	調查頻度	作業方式	說明
河道變遷	側向侵蝕 ★★	1 年	以全測站經緯儀進行七家灣溪一號壩上游 50 至 200 m 範圍河段橫斷面調查	側向侵蝕的發生可能進一步為危及道路安全或觸發崩塌。目前並無顯著側向侵蝕發生。
	溯源侵蝕終點遠離壩上游 800 m ★★★★	1 年	以全測站經緯儀進行七家灣溪一號壩至上游 1.4 km (觀魚台)河段範圍之縱斷面調查	
	坡地植被裸露 ★★★★	1 年	以空拍機拍攝七家灣溪一號壩下游 1.8 km (萬壽橋)至上游 1.4 km (觀魚台)之空拍圖或於農林航測所取得航照圖，判釋崩塌地並進行面積變遷分析	了解上游集水區水土保持狀況及河道土砂來源
	壩基淘空 ★★★★	1 年	以目視法或是空拍機進行結構物損壞情形現場調查	可由管理單位自行監測
	侵蝕土方量變化 ★★	2 年	以全測站經緯儀進行七家灣溪一號壩至上游觀魚台 1.4 km 範圍河段橫斷面調查	截至 2016/11，溯源侵蝕之累積侵蝕土方量約 18.2 萬 m <sup>3</sup>
	河道坡度 ★	3 年	以全測站經緯儀進行七家灣溪一號壩下游 1.8 km(萬壽橋)至上游 1.4 km (觀魚台)之縱斷面調查	七家灣溪河道坡度約介於 0.02~0.04 之間
	物理棲地類型變遷 ★	3 年	七家灣溪一號壩下游 1.8 km (萬壽橋)至上游 1.4 km (觀魚台)之物理棲地繪製	包含流況及河床質變化

表 6-2 七家灣溪一號壩壩體改善後河道變遷之作業方式(2/2)

監測工作項目	指標	調查頻度	作業方式	說明
淹水潛勢	保全區域之可通洪流量低於 20 年重現期距流量 ★★★	半年	於臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道進行現地調查，並以曼寧公式推算河道通洪能力： 河道幾何(斷面調查) 曼寧 n 值檢算 1. 流量頻率分析	根據壩體改善至今有紀錄之最大水文事件蘇拉颱風訂定。
	24 小時內累積雨量大於 300 mm ★★★	颱風期間	參考土石流防災資訊網 ( <a href="http://246.swcb.gov.tw/">http://246.swcb.gov.tw/</a> ) 之自動雨量站資料-桃山站	1.雨量警戒值訂定是根據過去記錄之七家灣溪重要歷史水文事件 2.可由管理單位自行監測
	萬壽橋水位站即時水位大於 4.75 m ★★★	颱風期間	於萬壽橋架設水文測站進行監測	1.根據壩體改善至今有紀錄之最大水文事件蘇拉颱風訂定 2.可由管理單位自行監測
	河道變遷歷程 ★★★	颱風期間	於保全區域(台灣櫻花鉤吻鮭生態中心、武陵管理站)附近河道架設影像監測系統	可由管理單位自行監測





## 第七章 結論與建議

### 7.1 結論

王筱雯(2012)指出在大流量下，雖有滿岸流量溢流之風險，但因河床泥砂之啟動等劇烈泥砂運移行為，原本淤積於此處的泥砂將被再帶往下游，造成河道通洪面積增加，減緩溢淹風險。由 2013 年 6 月 26 日、2014 年 5 月 17 日、2015 年度 3 月 20 日、2016 年 6 月 3 日及 2017 年 5 月 18 日五次調查可知，於非汛期期間，河道坡度皆由陡變緩，以致通洪斷面減少之情形。隨著水文事件的發生，如 2013 年蘇力颱風(近 5 年重現期距流量)、2014 年麥德姆颱風(近 2 年重現期距流量)、2015 年蘇迪勒颱風(近 5 年重現期距流量)、2016 年莫蘭蒂及梅姬颱風，以及 2017 年梅雨事件及尼莎颱風(近 2 年重現期距流量)，皆使下游河道可通洪流量增加。

本團隊以河道通洪能力檢算評估臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道淹水潛勢，依 2017 年 11 月之資料顯示，目前 S18 和 S17-1 斷面可通洪流量分別為 779 cms 和 578 cms，河道現況通洪能力分別可達 100 年及 50 年重現期，兩斷面現況皆大於保護標準 20 年重現期距流量，目前尚無須以清淤方式調整河道通洪面積及河段坡度，但因臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心為重要研究基地，建議持續監測。

由崩塌地調查顯示，2017 年 11 月調查成果顯示目前僅剩一處大面積崩塌，且由 2017 年 11 月之調查發現崩塌面積持續減小，原因為今年降雨事件並無造成崩塌情形發生且植生持續回復中而使裸露地面積呈現穩定縮小之趨勢，惟台灣地震且極端降雨(強降雨、長延時)頻繁仍可能進一步誘發崩塌，建議須長期監測河道周邊之崩塌狀況。

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

由河道縱斷面監測結果可知，七家灣溪一號壩溯源侵蝕終點由 2012 年至今一直落在壩上游約 800 m 處(S36 斷面)，而下游淤積終點由 2012 年至今一直落在壩下游約 900 m 處。

本研究亦將七年之成果歸納出監測指標，以時間尺度來看，河道和基礎設施之監測指標可分為颱風事件、年及長期，基於這樣的前提下，細部監測指標工作項目共可分為河道變遷及淹水潛勢兩大項共 12 項，而淹水潛勢中之「24 小時內累積雨量大於 300 mm」、「萬壽橋水位站即時水位大於 4.75 m」對於生態復育中心之生命財產安全較有即時之關聯，需持續辦理。

## 7.2 建議

本委託辦理計畫依據監測評估資料與河道變遷指標及作業方式提出供管理單位經營管理參考之建議，如下：

### (一) 即時監測

臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心為雪霸國家公園內重要保護標的，本研究提出「24 小時內累積雨量大於 300 mm」、「萬壽橋水位站即時水位大於 4.75 m」等兩對應之淹水潛勢監測指標，目前雪霸國家公園萬壽橋水位站之水位計與流速儀已架設完成並開始監測，本研究依據 2011 至 2017 年水文事件記錄，建立萬壽橋水文測站之水位流量率定曲線(式 2)，供管理單位即時推估使用，惟現有資料筆數太少，建議持續進行水文監測。

### (二) 保全區域例行性監測

#### 1. 一號壩

針對一號壩上游 50 至 200 公尺之左岸側向侵蝕情形，以現地河床橫斷面高程調查輔以影像監測掌握河岸狀況，進一步評估保全措施。

#### 2. 臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心

針對臺灣櫻花鉤吻鮭生態中心周圍河道之淹水潛勢，以現地河床縱橫斷面高程調查輔以水文及影像監測掌握保全區域之河道狀況，以做立即性之應對。

#### 3. 河道環境

針對河道環境變遷的掌握，除定點監測儀器與現地調查外，於汛期前後或重要水文事件前後進行空拍機影像拍攝，可以更即時及全面性的了解河道環境變遷，如崩塌地面積的增減、河道流路變遷、河岸狀況等，亦可作為未來相關河道環境規劃之基礎資料。

### (三) 長期監測

七家灣溪河道在不同強度水文事件(表 3-1)下之環境變動性與複雜性高，壩體改善至今辦理之相關監測已六年，但對於掌握河道整體環境狀況仍需持續且全

## 106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

面之調查，明年度調查項目建議可參考本委託辦理計畫所提出之監測指標，包含側向侵蝕(調查頻度：1 年，最新調查為 2017 年 11 月 11 日)、溯源侵蝕(調查頻度：1 年，最新調查為 2017 年 11 月 11 日)、坡地植被裸露(調查頻度：1 年，最新調查為 2017 年 11 月 11 日)、侵蝕土方量變化(調查頻度：2 年，最新調查為 2016 年 11 月 14 日)以及物理性棲地變遷(調查頻度：3 年；葉昭憲，2015)等，另建議管理單位持續針對七家灣溪一、三、四號壩及二號壩殘留壩體的安全性持續進行調查與了解，以進一步評估壩體安全對於下游保全標的之影響。

## 第八章 主要參考書

1. Cui, Y. and Wilcox, A., 2006. Numerical Modeling of Sediment Transport upon Dam Removal: Application to Marmot Dam in Sandy River, Oregon. In: Garcia, M.H. (ed), Sedimentation Engineering, ASCE Manual 110, ASCE, Reston VA.
2. Doyle, M.W., Stanley, E.H., and Harbor, J.M., 2002. Geomorphic analogies for assessing probable channel response to dam removal. *Journal of the American Water Resources Association* 38(6): 1567-1579.
3. Doyle, M.W., Stanley E.H., and Harbor J.M., 2003. Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin.” *Water Resource Research*, 39(1), 1-15.
4. East, A.E., Pess, G.R., Bountry J.A., Magirl, C.S., Ritchie, A.C., Logan, J.B., Randle, T.J., Mastin, M.C., Minear, J.T., Duda, J.J., Liermann, M.C., McHenry, M.L., Beechie, T.J., Shafroth, P.B., 2014. Large-scale dam removal on Elwha River, Washington, USA: River channel and floodplain geomorphic change. *Geomorphology*, article in press.
5. Evans, J.E., 2007. Sediment Impacts of the 1994 Failure of IVEX Dam (Chagrin River, NE Ohio): A Test of Channel Evolution Models.” *Journal of Great Lakes Research*, 33(sp2), 90-102.
6. Ferry, M. and Miller, P., 2003. The removal of Saeltzer Dam on Clear Creek: An update. *Water Resources Library*, U.C. Berkeley.
7. Foley, M. M., Bellmore, J. R., O'Connor, J. E., Duda, J. J., East, A. E., Grant, G. E., ... & Craig, L. S. (2017). Dam removal-Listening in. *Water Resources Research*.

8. Grant, G.E., and Lewis, S.L., 2015. The remains of the dam: What have we learned from 15 years of U.S. dam removals? in *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*, edited by G. Lollino et al., 31–35.
9. Major, J.J., East, A.E., O'Connor, J.E., Grant, G.E., Wilcox, A.C., Magirl, C.S., Collins, M.J., and Tullos, D.D., 2017. Geomorphic response to U.S. Dam Removals—A two-decade perspective, in *Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters*, edited by D. Tsutsumi and J. Laronne, 355–383, Wiley and Sons.
10. Miller, P., and Vizcaino, P., 2004. Channel response to dam removal, Clear Creek, California. *Water Resources Library*, U.C. Berkeley.
11. Pizzuto, J., 2002. Effects of Dam Removal on River Form and Process, *BioScience* 52(8): 683 - 691.”
12. Sawaske, S.R., and Freyberg, D.L., 2012. A comparison of past small dam removals in highly sediment-impacted systems in the U.S., *Geomorphology*, 151 152–, 50–58.
13. Stewart, G., Grant, G.E., 2005. Potential Geomorphic and Ecological Impacts of MarmotDam Removal, Sandy River, OR: Final Report. Prepared for Portland General Electric, Portland, Oregon, July 2005.
14. Stillwater Sciences, 2001. Comparison of predicted and observed geomorphic changes following the removal of Saeltzer Dam: Task 6 Deliverable Report. Stillwater Science, Berkeley, CA.
15. Tullos, D. and Wang, H.W., 2014. Morphological responses and sediment processes following a typhoon-induced dam failure, Dahan River, Taiwan. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(2): 245-258. DOI: 10.1002/esp.3446
16. Major, J.J., O'Connor, J.E., Podolak, C.J., Keith, M.K., Grant, G.E., Spicer, K.R., Pittman, S., Bragg, H.M., Wallick, J.R., Tanner, D.Q., Rhode, A., and Wilcock,

- P.R., 2012. Geomorphic response of the Sandy River, Oregon, to removal of Marmot Dam. USGS Professional Paper, 1792, 64.
17. Randle, T.J., Bountry, J.A., and Ritchie, A., Wille, K., 2014. Large-scale dam removal on Elwha River, Washington, USA: erosion of reservoir sediment. *Geomorphology*, article in press.
  18. U.S. Department of Interior, 1996. Removal of Elwha and Glines Canyon Dams. U.S. Bureau of Reclamation. Elwha Technical Series PN-95-7: 86.
  19. Wunderlich, R.C., Winter, B.D., and Meyer, J.H., 1994. Restoration of the Elwha River ecosystem. *Fisheries* 19(8):11-19.
  20. Wilcox, A., O'Connor, J., and Major, J., 2013. Rapid reservoir erosion, hyperconcentrated flow, and downstream deposition triggered by breaching of 38m tall Condit Dam, White Salmon River, Washington. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 10.1002/2013JF003073.
  21. 廖林彥，2001，高山溪防砂壩改善前後棲地變之調查研究，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
  22. 王筱雯，2010，七家灣溪一號壩壩體及棲地改善工程－泥砂衝擊物理模型及數值分析，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
  23. 王筱雯，2011，武陵地區溪流生態系長期監測暨整合研究-七家灣溪一號壩壩體改善工程之水文與泥砂監測，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
  24. 王筱雯，2012，七家溪一號壩壩體改善後河道環境衝擊評估，內政部營建署雪霸國家公園管理處。
  25. 王筱雯、郭偉丞、張家豪，2013，七家灣溪拆壩後之河道演變模式，*中華水土保持學報*, 44(4): 271-281.
  26. 王筱雯，2013，武陵地區溪流生態系及七家灣溪一號防砂壩壩體改善後研究-物理棲地與水文泥砂研究，內政部營建署雪霸國家公園管理處。



106 年七家灣溪水文泥砂監測 成果報告

27. 王筱雯, 2014, 七家灣溪水文影像監測, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。
28. 王筱雯, 2015, 七家灣溪水文影像監測, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。
29. 王筱雯, 2016, 七家灣溪水文泥砂監測, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。
30. 林欣怡, 2008, 防砂壩移除對河床變遷影響之研究—以巴陵壩為例, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
31. 朱木壽, 2010, 渠道高流量非接觸式量測及其準確度之研究, 國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
32. 財團法人台灣水利環境科技研究發展教育基金會(TIIWE), 2009, 橫向水工結構物移除、改善與河川復育效益評估(2/3), 經濟部水利署水利規劃試驗所。
33. 葉昭憲, 2007, 七家灣溪壩體改善研究評估, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。
34. 葉昭憲、王傳益, 2008, 七家灣溪一號防砂壩壩體改善之試驗研究, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。
35. 葉昭憲、王永賢, 2010, 武陵地區生態系長期監測與研究-物理棲地研究, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。
36. 葉昭憲, 2015, 武陵地區七家灣溪及有勝河流域壩體改善後溪流物理地調查監測, 內政部營建署雪霸國家公園管理處。

## 附錄一 期末審查意見回覆

審查意見	執行單位回覆	頁碼
<b>(一) 連惠邦教授書面意見</b>		
1. 摘要內容是否能夠充分反應出本計畫於本年度的監測成果，請考量？	感謝委員建議，已重新調整並反應本年度監測成果於摘要內容。	I-IV
2. 報告中有關「掏刷」應改成「淘刷」；另，「拆壩」改為「壩體改善」。	遵照辦理，已於成果報告中修正。	
3. 建議報告寫法宜先說明本年度的監測結果，再以此結果比較以往的監測資料。	遵照辦理。	
4. 本計畫為何沒有雨量資料？建議如有持續監測計畫時，應架設 2 座雨量計。	感謝委員建議。已納入附近雨量監測站之相關資料於成果報告中。	39
5. p32，表 4-2 宜補充至 2017 年之水位記錄。	感謝委員建議，完整之水位記錄如表 5-2。另於重新編排章節後，將表 4-2 刪除。	58
6. p34 航照圖相當模糊，而 p36 中流路應以顏色區分(為何獨缺 2016 年流路資料)。另，補充說明流路變遷的意義。	1. 1980、1987、1996 年航照圖模糊之主要原因為早期拍攝器材規格不高所致。 2. 圖 4-7 流路改以藍色呈現，並補充 2016 年之流路資料。 3. 造成流路變遷的可能原因包含水文事件尺度、河床質粒徑組成、河谷配置、地質條件、漂流木、巨石或崩塌等因素影響，然而在相關資訊不足的情況下，僅藉由航照圖辨識，無法進一步分析造成流路變遷之原因，相關說明已於文中補充。	41-45
7. p37 補充 2001 年、2002 年及 2009 年總崩塌面積之文獻。根據歷年資料顯示，研究區崩塌面積不大，其造成的土砂流失	感謝委員意見，於期中報告中已說明總崩塌面積之文獻係出自於王筱雯(2010)。本計畫之崩塌地調查工作項僅針對三公里之	

<p>量也不足以對河道產生影響，惟這也導致河道砂源不足，幸近年來無較大降雨，故河道仍然能夠維持一定的沖淤互現的近平衡狀態(p49)。</p>	<p>河段範圍進行調查，因此未能掌握調查範圍外之河段(如更上游)是否有崩塌情形發生，難以有足夠科學證據說明砂源是否不足。</p>	
<p>8. 本年度監測無河床質採樣？p43，泥砂顆粒粒徑分布以曲線型式表達有點怪？請再查明正確表現方式。</p>	<p>感謝委員意見，本計畫之工作項並未涵蓋河床質採樣。期末報告中 p43 圖 4-13 是根據逢甲大學葉昭憲老師團隊於七家灣溪所做之粒徑採樣，其原始資料中以表呈現各粒徑所對應之百分比(詳如林幸助等人,2011,表 3-38、3-39、3-45、3-47；林幸助等人,2012,表 3-13~3-16)，本團隊於資料綜整後改以圖做呈現。</p>	<p>51</p>
<p>9. p49，補充說明表 5-1 量測結果之意義？</p>	<p>遵照辦理，已於成果報告中補充說明。</p>	<p>56</p>
<p>10. p52 表明水位與濁度無絕對正相關性，惟個人認為它具有很重要的意義。水位高但濁度低，應是本區崩塌少，砂源不足所致，以致於水砂未等比例增加，並不能說兩者無關，相關敘述請再修改。</p>	<p>感謝委員意見，報告中所述為水位與濁度兩因子無統計回歸上之正相關性，並非述其無關。惟已調整相關說明，以使語意明確。</p>	<p>60</p>
<p>11. p59，表 5-5 的解讀有誤，汛期及常時的沖淤問題的說明請再確認。正常來說，沖刷一定是造成坡度減緩，汛期沖刷坡度變緩，枯水期坡度又增加。</p>	<p>感謝委員意見。沖刷與坡度有其關聯，惟河道變動之討論中，亦有其他因子尚需考量。已酌予調整相關說明。</p>	<p>67</p>
<p>12. p67，因河道屬動床，常時量測其坡度及床底高程並不能因此說明其通洪能力升降問題。</p>	<p>感謝委員意見，因颱風時期河道水砂作用強烈且複雜，目前尚無研究能準確預測或驗證動床河道於洪水期間之河道通洪能力。本團隊在經費有限的情況下，僅能在假設河道為定床的情況下，以相同之標準來檢視不同時期河道之通洪能力，以供管理單位做參考。相關說明與限制皆已呈現於報告內文中。</p>	<p>75</p>

13. p70 水位及流速量測設置於動床斷面，並據以推估其流量，是否可信，請考量？	感謝委員意見，本團隊過去曾會同颱洪中心於七家灣溪主流全河段進行踏勘，除上游三號壩壩址處外，並無適合架設測站之定床斷面，經評估 1.電力需求 2.現地可及性 3.儀器安全 4.人員安全等條件，萬壽橋為較佳之架站地點。在現地環境條件受限的情況下，本團隊盡可能的藉由現地調查來校正數據，以提高流量推估的可信度。	78
14. 建議後續宜針對雨量、水位、斷面及河床質等因子進行監測，並購買衛星影像判釋研究區崩塌及流路變遷；另應思考發展河道水理輸砂數值模式之必要性，以進行各種降雨及崩塌量條件下模擬本區河道之耐受度。	感謝委員建議，河道環境相關因子持續監測有其必要性，河道水理輸砂數值模式發展亦可供管理單位經營管理之參考，本團隊建議另案辦理。	
15. 在相同斷面下，水位與流量勢必成正比，公式也反應這個事實，但簡報與報告不同，請再確認。	感謝委員意見，報告中式 3 為誤植，已於成果報告中修正。由於測站設置於動床斷面，斷面形狀將隨時間而改變，因此不同時期之斷面在相同水位下，通水面積或水理條件不盡相同，如 2017/5/18 與 2017/10/28 之斷面若水位同為 3 m，其通水面積分別為 23 m <sup>2</sup> 與 30 m <sup>2</sup> ，因此水位與流量不一定成正比。	80
<b>(二) 潘振彰技正</b>		
1. 本年度氣象局在武陵的雪山東峰、圈谷、桃山設置氣象測站，均在同一個集水區內，未來雨量的資料或可做一個參考。	感謝委員意見，未來將參考所建議之雨量站。	
<b>(三) 于淑芬課長</b>		
1. 高山溪曾在 5-6 年前發生崩塌，下雨後濁度就增加，此非今年才出現的。	感謝委員意見。	

<p>2. p53 引用文獻—王筱雯、劉紋伶(2014)應用 SPSS 統計分析軟體分析七家灣溪水文資料之自相關係數、二元交叉相關係數與移動平均法，請再進一步說明研究結果。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>61</p>
<p>3. p56 河道環境圖缺 2016、2017 年資料，請再補充。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>65</p>
<p>4. p68 通洪能力與流量關係之描述請再確認。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>75-77</p>
<p><b>(四) 鍾銘山處長</b></p>		
<p>1. 在有限經費的情況下，請受託單位考量除既有的工作指標監測外，後續的延伸分析與預測。</p>	<p>感謝委員意見，本團隊將謹慎評估在既有人力與有限的經費下，後續可進行之研究。</p>	
<p>2. 建議未來的研究方向可強化整合分析，提出經營管理上的具體建議。</p>	<p>感謝委員建議，本團隊持續研究河道環境考量下的具體經營管理建議，惟建議管理單位在經費允許下，或可考慮重啟武陵長期監測暨整合研究計畫，藉由跨領域合作，進一步可提出經營管理上整合且全面性的具體建議。</p>	
<p><b>會議結論</b></p>		
<p>1. 本次報告原則同意通過審查。</p>	<p>感謝委員認可。</p>	
<p>2. 請依審查委員所提供之書面意見及與會人員意見修正，並依契約提交成果報告書後，辦理第三期款請款等事宜。</p>	<p>遵照辦理。</p>	