
114 年複合式護岸材質粗糙係數分析應用

**Analysis and Application of Composite
Roughness Coefficient of Revetment in 2025**

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：114 年 1 月 24 日至 114 年 12 月 10 日

計畫主持人：黃宏斌 研究員

協同主持人：李偉哲 總監

潘宗毅 副研究員

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 114 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考）

114 年複合式護岸材質粗糙係數分析應用

摘要

本計畫延續農村水保署近年工程成果，選定造型模板、乾砌石與生態槽混搭造型模板等 3 種常用之複合式護岸類型，探討複合式護岸使用適宜時機及提供規劃設計注意事項。為了滾動修正理論模式，本計畫持續收集猴猴坑溪、福德坑溪、打鐵坑溪等 3 野溪樣區之雨量及水位資料觀測。

除了彙整、分析目前常見之複合式粗糙係數模式外，也將現場雨量和水位資料進行滲漏量、流量分析，接著修正已收集之複合式粗糙係數模式，並研發複合式粗糙係數表。為了避免工程構造物或伏流水阻礙水域動物通道，本計畫亦撰寫程式輔助枯水期間之生態水深之低水流路設計。最後，本計畫邀請農村水保署及技師公會代表召開座談會，說明本計畫研發之複合式護岸粗糙係數表，並收集與會代表意見，持續精進修正。

本計畫依據其輸入參數將 Horton 與 Einstein; Pavlovskii; Felkel、Yen 1; Yen 3; U^* ; F4; 和 Colebatch 這 8 種模式分為濕周參數群、濕周與水力半徑參數群，以及面積參數群等三大類。經過計算分析，得到下列主要結果：1. n/n_B 對 T/y 之關係曲線趨勢影響不大。2. 邊坡粗糙係數與河床質粗糙係數相近時， n_B 可以代表複合式粗糙係數， $\square$ 。3. 當 $n_r > \square$ ， n/n_B 會隨 T/y 由大轉小，最後趨近於 1.0。4. 當 $n_r < \square$ ， n/n_B 會隨 T/y 由小轉大，最後趨近於 1.0。

關鍵詞：複合式粗糙係數、寬深比、河床質

Analysis and Application of Composite Roughness Coefficient of Revetment in 2023

Abstract

This project inherited the construction achievements of ARDSWC selecting three pavements of styling template, masonry, and compound ecological tank with styling template located respectively in Houhoukeng, Fudekeng, and Datiekeng Creeks to discuss the appropriate time to use composite revetment and provide planning and design considerations.

In addition to analyzing the collected composite roughness models, on-site rainfall and water level data were also used to analyze leakage, flow discharge, and revise the collected composite roughness models as well as a roughness coefficient table. To prevent constructions or subsurface water from obstructing aquatic passage, the project developed a program to design an ecologic depth during dry seasons. Finally, the project invited delegates to hold a symposium.

This project according to input parameters classified eight models to three groups of wetted perimeters, wetted perimeter & hydraulic radius, and area. After calculation and analyses, the primary results were as following: 1. The parameter of bank slope had negligible affection to relationship of n/n_B versus T/y . 2. When bank and creek bed had similar roughness in material, the roughness of creek bed could represent composite roughness. 3. n/n_B decreased with T/y and finally approached to 1.0 as $n_r > 1$. 4. n/n_B increased with T/y and finally approached to 1.0 as $n_r < 1$.

Keywords: Composite roughness, Aspect ratio, Bed material

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VII
第一章 前言.....	1-1
第一節 計畫目的	1-1
第二節 計畫項目與內容	1-2
第三節 分段進度	1-4
第二章 複合式護岸設計規劃注意事項研擬.....	2-1
第一節 造型模板混凝土護岸	2-1
第二節 乾砌石護岸	2-7
第三節 生態槽混搭造型模板護岸	2-11
第三章 持續進行野溪樣區水文觀測.....	3-1
第一節 研究樣區選擇條件	3-1
第二節 研究樣區介紹	3-3
第三節 水文觀測設備	3-6
第四節 水文觀測設備安裝	3-9
第五節 水文觀測流程	3-20
第四章 粗糙係數分析.....	4-1
第一節 滲漏量分析	4-1

第二節 野溪流量分析	4-10
第三節 複合式粗糙係數分析	4-12
第四節 複合式粗糙係數修正	4-60
第五節 研發複合式護岸粗糙係數表	4-65
第六節 生態水深之低水流路寬度設計建議.....	4-72 第
七節 辦理 1 場次座談會	4-77
第五章 結論與建議	5-1
第一節 結論	5-
1 第二節 建議	5-
1	
參考文獻.....	參-1
附 錄.....	附錄 1-1
附錄一、期初審查意見暨回覆辦理情形(114 年 4 月 9 日)	附錄 1-1
附錄二、期中審查意見暨回覆辦理情形(114 年 8 月 28 日)	附錄 2-1
附錄三、期末審查意見暨回覆辦理情形(114 年 11 月 27 日)	附錄 3-1
附錄四、期初審查會議紀錄	附錄 4-1
附錄五、期中審查會議紀錄	附錄 5-1
附錄六、期末審查會議紀錄	附錄 6-1

表次

表 1-1 分段進度檢核表	1-4
表 2-1 不同材質造型模板價錢、耐用度和美觀比較	2-2
表 3-1 研究樣區基本資料	3-4
表 3-2 雨量計規格參數	3-7
表 3-3 水位計規格參數	3-8
表 3-4 無因次降雨強度公式係數	3-21
表 3-5 研究樣區集水區參數	3-21
表 3-6 不同重現期距之暴雨深度(毫米)	3-21
表 3-7 最大日雨量、最大二日雨量和年雨量表	3-22
表 4-1 無降雨事件期間之水位紀錄	4-7
表 4-2 研究樣區水位歷線之相關參數	4-8
表 4-3 集水區流量站參數	4-10
表 4-4 集水區洪峰流量	4-10
表 4-5 Cowan 模式之各項參數值	4-15
表 4-6 複合式粗糙係數模式彙整表	4-24
表 4-7 對數速度分布假設條件之複合式粗糙係數模式	4-26
表 4-8 猴猴坑福祿數對雷諾數迴歸統計表	4-35
表 4-9 猴猴坑福祿數對雷諾數 ANOVA 成果表	4-35
表 4-10 猴猴坑福祿數對雷諾數 X 變數與截距成果表	4-35
表 4-11 福德坑福祿數對雷諾數迴歸統計表	4-36
表 4-12 福德坑福祿數對雷諾數 ANOVA 成果表	4-36
表 4-13 福德坑福祿數對雷諾數 X 變數與截距成果表	4-36

表 4-14 打鐵坑福祿數對雷諾數迴歸統計表	4-36
表 4-15 打鐵坑福祿數對雷諾數 ANOVA 成果表	4-36
表 4-16 打鐵坑福祿數對雷諾數 X 變數與截距成果表	4-37
表 4-17 三種鋪面材質之粗糙係數成果	4-37
表 4-18 Pradhan & Khatua 分析成果	4-40
表 4-19 方程式參數說明表	4-51
表 4-20 模式參數指數變化	4-51
表 4-21 不同邊坡斜率之 α 、 β 值	4-52
表 4-22 不同 T/y 、 n_y 情況下之 n/n_B 值	4-54
表 4-23 農業部五件優良農建工程之相關水理參數	4-60
表 4-24 模式計算複合式粗糙係數成果表	4-61
表 4-25 原粗糙係數與複合式粗糙係數對照	4-61
表 4-26 粗護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=10$)	4-65
表 4-27 粗護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=30$)	4-66
表 4-28 細護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=10$)	4-66
表 4-29 細護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=30$)	4-67
表 4-30 研究樣區基本資料	4-75
表 4-31 生態水深設計之輸入參數	4-75
表 4-32 生態水深計算成果	4-76
表 4-33 座談會課程內容	4-78

圖次

圖 1-1 整體工作流程圖	1-5
圖 1-2 預定工作進度	1-6
圖 2-1 猴猴坑溪造型模板護岸	2-1
圖 2-2 整理自天強有限公司網頁之造型模板樣式	2-3
圖 2-3 新北市金山區環湖三橋上游乾砌石護岸	2-7
圖 2-4 新竹東興圳營造翠鳥棲地	2-10
圖 2-5 崎林橋上游生態槽混搭造型模板護岸	2-11
圖 3-1 猴猴坑溪集水區	3-4
圖 3-2 福德坑溪集水區	3-5
圖 3-3 打鐵坑溪集水區	3-5
圖 3-4 UT-R0001 雨量計	3-6
圖 3-5 水位計	3-8
圖 3-6 水文觀測設備安裝地點位置圖	3-9
圖 3-7 猴猴坑溪水位計架設位置圖	3-10
圖 3-8 猴猴坑溪水文觀測設備安裝	3-11
圖 3-9 猴猴坑溪上下游水位計通視圖	3-11
圖 3-10 猴猴坑溪水位站斷面資料	3-12
圖 3-11 鳳凰颱風外圍環流沖壞猴猴坑溪水位計	3-12
圖 3-12 福德坑溪水位計架設位置圖	3-13
圖 3-13 福德坑溪水文觀測設備安裝	3-14
圖 3-14 福德坑圳渠首工	3-14
圖 3-15 福德坑溪水位站斷面資料	3-15

圖 3-16 打鐵坑溪水位計架設位置圖	3-16
圖 3-17 打鐵坑溪水文觀測設備安裝	3-17
圖 3-18 打鐵坑溪水位站斷面資料	3-18
圖 3-19 候選樣區照片	3-19
圖 3-20 水文觀測工作流程	3-20
圖 3-21 猴猴坑之雨量與水位紀錄(2021~2025 年).....	3-24
圖 3-22 福德坑之雨量與水位紀錄(2021~2025 年).....	3-25
圖 3-23 打鐵坑之雨量與水位紀錄(2021~2025 年).....	3-26
圖 3-24 蘇澳最大日降雨量事件雨量組體圖	3-27
圖 3-25 頭城最大日降雨量事件雨量組體圖	3-28
圖 3-26 龍潭最大日降雨量事件雨量組體圖	3-29
圖 3-27 猴猴坑自記雨量與蘇澳站雨量比較圖(2021~2025 年).....	3-32
圖 3-28 福德坑自記雨量與蘇澳站雨量比較圖(2021~2025 年).....	3-33
圖 3-29 打鐵坑自記雨量與蘇澳站雨量比較圖(2021~2025 年).....	3-34
圖 3-30 三樣區自記雨量與官方雨量站雨量比較圖	3-35
圖 3-31 梯形斷面渠道示意圖	3-36
圖 3-32 明渠流況兩斷面之能量示意圖	3-38
圖 4-1 猴猴坑溪地質圖	4-2
圖 4-2 福德坑溪地質圖	4-4
圖 4-3 打鐵坑溪地質圖	4-6
圖 4-4 無降雨期間平均水位	4-7
圖 4-5 猴猴坑與福德坑計算滲漏量之歷線	4-8
圖 4-6 研究樣區單峰水位歷線	4-9

圖 4-7 研究樣區洪峰流量與水深關係圖	4-11
圖 4-8 單一斷面示意圖	4-18
圖 4-9 複式斷面示意圖	4-18
圖 4-10 曼寧粗糙係數對雷諾數關係圖	4-30
圖 4-11 能量損失對雷諾數關係圖	4-32
圖 4-12 達西-韋斯巴哈粗糙係數對雷諾數關係圖	4-34
圖 4-13 福祿數對雷諾數關係圖	4-38
圖 4-14 不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化(Horton)	4-55
圖 4-15 不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化(Yen3)	4-56
圖 4-16 不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化(Colebatch)	4-57
圖 4-17 三模式於不同寬深比之複合式粗糙係數變化	4-58
圖 4-18 三模式於不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化	4-59
圖 4-19 模擬案例照片	4-64
圖 4-20 粗護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=10$)	4-68
圖 4-21 細護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=10$)	4-69
圖 4-22 粗護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=30$)	4-70
圖 4-23 細護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=30$)	4-71
圖 4-24 複式斷面示意圖	4-73
圖 4-25 座談會相關照片	4-80

第一章 前言

第一節 計畫目的

有關規劃設計野溪治理或整流工程時，高粗糙度材質如乾砌石護岸於粗礫石河床所採用之粗糙係數與粗礫石河床粗糙係數相近時，可以得到合理之設計水深。細粗糙度材質如方石護岸於粗礫石河床所採用之粗糙係數為粗礫石之較大粗糙係數時，會得到較高之設計水深，除增加工程經費外，也會使加高之護岸成為水、陸域生態通道之額外障礙。乾砌石護岸於細砂石河床所採用之粗糙係數為細砂石之較小粗糙係數時，則會低估設計水深，導致護岸設計高度不足，而有洪流溢淹之可能。由大部分工程優質獎得獎作品複合式護岸粗糙係數之不合學理選用，即可瞭解設計技師之困境。本計畫之成果經過專家學者審查與行政機關核可後，將以簡單實用之複合式護岸粗糙係數表提供產官學界做為未來護岸設計規劃參考使用。

第二節 計畫項目與內容

一、提供複合式護岸設計規劃注意事項

- (一) 延續農村水保署近年相關分析成果，選定 3 種常用之複合式護岸類型，探討複合式護岸使用適宜時機及提供規劃設計注意事項。

二、持續進行野溪樣區水文觀測：

- (一) 針對農村水保署近年選定之 3 處觀測溪流點位(猴猴坑溪、福德坑溪、打鐵坑溪)，持續辦理現地水文資料觀測，以利資料數據充足利於滾動式檢討分析使用。
- (二) 觀測設備持續架設及維護，並定期觀測收集現地雨量及水位資料(每個月至少收回現場資料 1 次、颱風及豪雨前後加強 1 次收集及維護確保儀器設備安全)。
- (三) 相關原始數值資料部分，將依農村水保署數值資料標準格式範本辦理，並上傳至農村水保署水砂觀測相關系統儲存。

三、辦理粗糙係數分析

- (一) 滲漏量分析：將所收集到之雨量和水位資料，持續檢討分析 3 條野溪河段之滲漏量。
- (二) 野溪流量分析：由觀測數據持續辦理臨界水深之水位資料計算，分析推估 3 條野溪河段流量。
- (三) 複合式粗糙係數分析：持續運用現地水位計所測得之正常水位資料，配合 3 條野溪流量推估成果，以不同假設條件求得不同之複合式護岸粗糙係數數值。
- (四) 複合式粗糙係數修正：增列當年觀測所增加之雨量、水位資料，配

合室內相關試驗成果，以不同假設條件計算複合式粗糙係數及其修正值。

- (五) 研發複合式護岸粗糙係數表：藉由近幾年所得數據分析之成果，彙整 3 種複合式護岸之粗糙係數簡易表，提供未來規劃設計時參考使用。
- (六) 生態水深之低水流路寬度設計建議：彙整複合式護岸粗糙係數與滲漏量研析成果，提出規劃設計時建議生態水深之低水流路合理寬度設計參考值。
- (七) 辦理複合式護岸材質粗糙係數座談會：邀集農村水保署各分署及相關技師公會代表召開 1 場次座談會，針對本計畫研發之複合式護岸粗糙係數簡易表推廣說明，並收集與會代表意見，持續精進修正粗糙係數簡易表。

第三節 分段進度

一、期初簡報時需完成工作：

- (一) 蒐集農村水保署常用 3 種不同複合式護岸型式及相關資料。
- (二) 提出野溪樣區水文觀測及設備架設維護規劃。

二、期中簡報時需完成工作：

- (一) 完成農村水保署常用 3 種不同複合式護岸型式適切性分析。
- (二) 完成選定之 3 條野溪樣區現地分析初步成果。
- (三) 完成複合式護岸粗糙係數表初步設計。

三、期末簡報時需完成所有工作。

四、期末報告至契約完成期間，如委託機關發現問題仍需協助修正。

分段進度檢核表如表 1-1 所示。

表 1-1 分段進度檢核表

一、期初簡報時需完成工作	
(一)蒐集農村水保署常用 3 種不同複合式護岸型式及相關資料。	完成
(二)提出野溪樣區水文觀測及設備架設維護規劃。	完成
二、期中簡報時需完成工作：	
(一)完成農村水保署常用 3 種不同複合式護岸型式適切性分析。	完成
(二)完成選定之 3 條野溪樣區現地分析初步成果。	完成
(三)完成複合式護岸粗糙係數表初步設計。	完成
三、期末簡報時需完成所有工作。	完成

(一) 整體工作流程

本計畫依預定工作項目及其內容研擬執行流程如圖 1-1 所示。

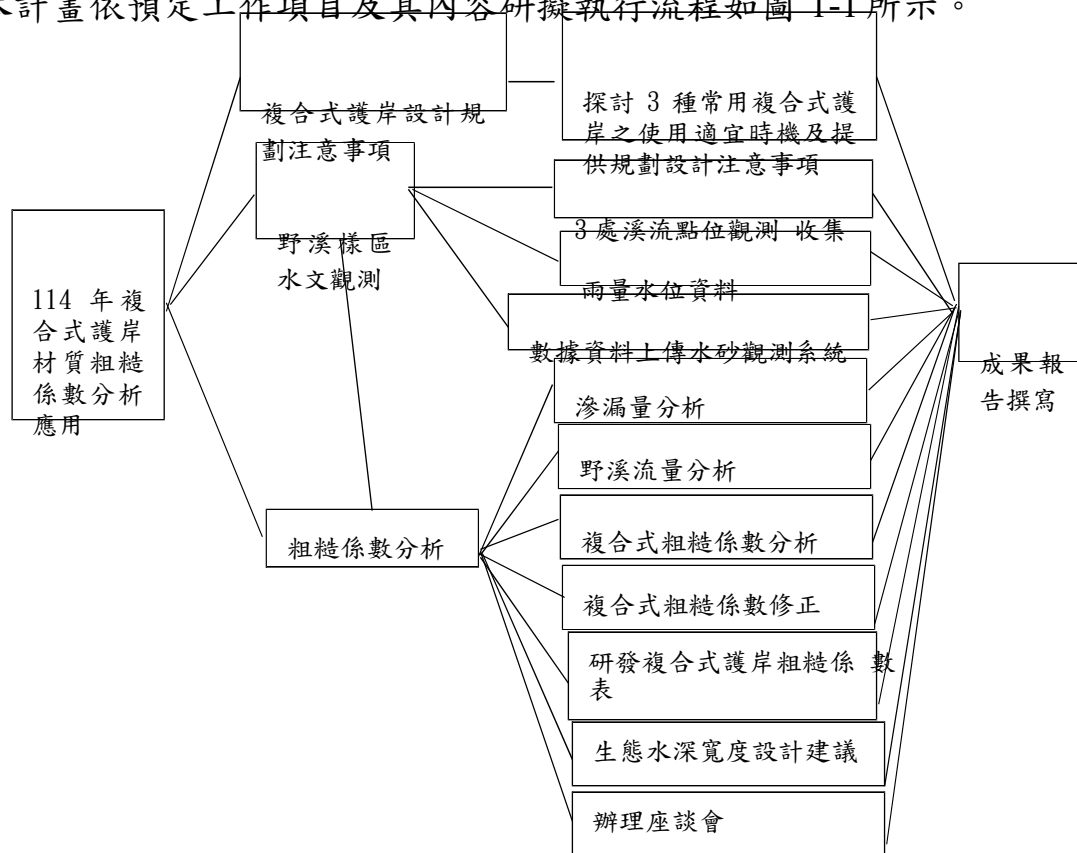


圖 1-1 整體工作流程圖

(二) 預定工作進度

本計畫自決標次日起至民國 114 年 12 月 10 日完成，各項工作預定進度如圖 1-2 所示。

項目	完成百分比 (%)	114 年											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
複合式護岸設計規劃注意事項	100												
野溪樣區水文觀測	100												
粗糙係數分析	100												
期初報告	100												
期中報告	100												
期末報告	100												
成果報告	100												
		12	24	35	47	55	62	70	78	85	93	96	100

圖 1-2 預定工作進度

第二章 複合式護岸設計規劃注意事項研擬

延續農村水保署近年相關分析成果，選定造型模板混凝土護岸、乾砌石護岸和生態槽混搭造型模板護岸等 3 種常用之複合式護岸。其設計規劃注意事項如下：

第一節 造型模板混凝土護岸

造型模板護岸係具有模仿石板、岩石或砌石等臨水坡面之混凝土或鋼筋混凝土護岸，屬於重力式，或半重力式，或懸臂式，或扶壁式剛性結構體。如圖 2-1 所示。



圖 2-1 猴猴坑溪造型模板護岸 造型模板可以採用保麗龍(EPS)、聚丙烯(EPP、EPO)、玻璃纖維(FRP)和橡膠等材質，價錢、耐用度和美觀都不同。表 2-1 不同材質造型模板價錢、耐用度和美觀比較。

表 2-1 不同材質造型模板價錢、耐用度和美觀比較

	單價(元/m ²)	耐用度	美觀	施工難易度
ABS 塑膠	高	低	優	容易
保麗龍	低	最低	優	容易
聚丙烯	高	低	優	容易
玻璃纖維	最高	高	佳	中等
橡膠	最低	最高	差	困難

資料來源：不同網站搜尋彙整

目前造型模板材料以 EPO 發泡材質和 ABS 塑膠材質為主。單價因材質、圖案複雜度、數量和運送距離而定。近三年臺北分署造型模板單價在 600~730 元/m²。屏東縣政府因運送距離較遠，有 830 元/m²之經費預估。

造型模板護岸係為了營造天然溪流環境，以及增加護岸臨水面粗糙度，提供動、植物攀爬介面，在混凝土或鋼筋混凝土護岸之臨水面，以模仿石板、岩石或砌石之模板代替原有光滑之木造或鋁合金模板，灌注混凝土砂漿而成。除了選用不同造型之模板外，設計原則同混凝土或鋼筋混凝土護岸。

天強有限公司網頁提供之部分造型模板樣式如圖 2-2。

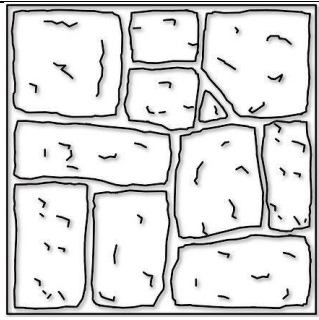
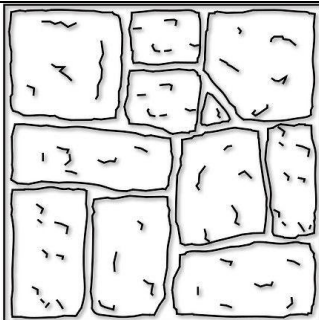
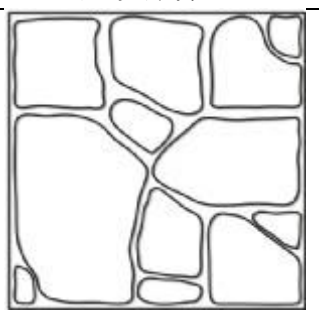
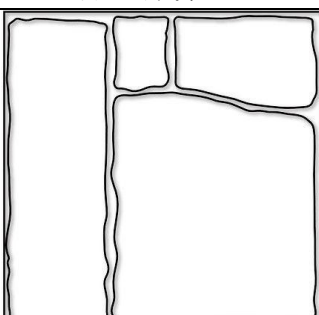
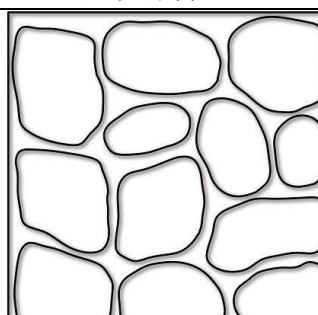
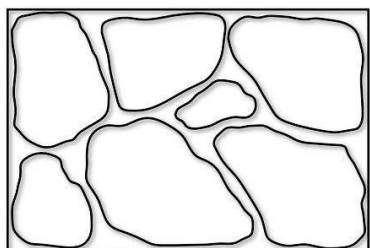
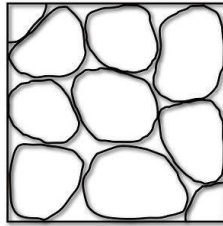
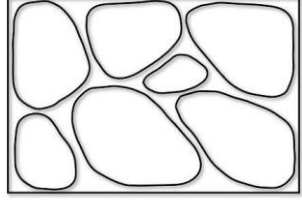
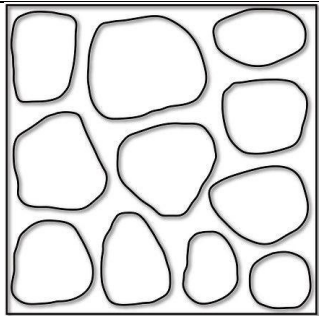
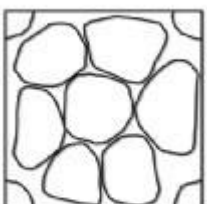
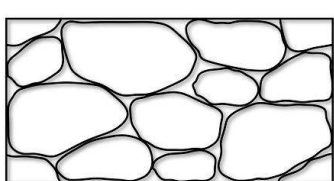
		
ABS 塑膠材質	EPO 發泡材質	ABS 塑膠材質
		
ABS 塑膠材質	EPO 發泡材質	ABS 塑膠材質
		
ABS 塑膠材質	ABS 塑膠材質	ABS 塑膠材質
		
EPO 發泡材質	ABS 塑膠材質	EPO 發泡材質

圖 2-2 整理自天強有限公司網頁之造型模板樣式

資料來源：天強有限公司網頁

一、布置原則

- (一) 適用於需要耐衝擊、抗沖刷、增加表面粗糙度，以及融合當地景觀之溪段。
- (二) 能夠保護溪岸基腳，避免邊坡崩塌致生災害溪段，尤其是彎道凹岸處或水流直接沖擊處等。
- (三) 因護岸結構體重量較大，適用於承载力足夠之溪床。

二、本體設計

- (一) 護岸高度：一般採用設計洪水位加上出水高為護岸高度，如果比照重力式或半重力式擋土牆設計，建議以有效高在4米以下為原則；比照懸臂式擋土牆則以有效高在8米以下為原則；比照扶壁式擋土牆則以有效高在10米以下為原則。同時，可視實際需要在護岸上方設計植生岸坡，但是需要計入加載重量。依據水土保持技術規範，護岸設計洪水量以重現期距50年之降雨強度計算。
- (二) 臨水面坡度：配合原有臨水面坡度，並考慮水、陸域動物通道坡度設計。
- (三) 基礎深度：造型模板混凝土護岸以重力式擋土牆設計之安定檢討成果為基礎；造型模板鋼筋混凝土護岸則以半重力式，或懸臂式，或扶壁式擋土牆設計之安定檢討成果為基礎，配合尖峰流量與流速所推算之沖刷深度設計基礎深度。為避免基礎淘刷，彎道凹岸處應視河床地質狀況斟酌增加基礎深度。
- (四) 彎道處理：除了加深彎道凹岸處之基礎深度外，建議放寬溪流寬度或加高凹岸處之護岸高度。水流與護岸法線平行時，衝擊力較大，亦即在彎道120度附近之衝擊力最大；與護岸法線成90度

角時，衝擊力最小，僅有剪應力。

- (五) 岸線：起點應有穩固之地形或銜接防砂壩或潛壩，終點應有適當之消能設施。彎道護岸工程範圍應涵蓋彎道起、終點。比照混凝土護岸，造型模板混凝土護岸長度每 20 米至 40 米應加設伸縮縫。
- (六) 安定檢討除考慮水壓力外，造型模板混凝土護岸其餘參數與重力式擋土牆相同；造型模板鋼筋混凝土護岸其餘參數則與半重力式，或懸臂式，或扶壁式擋土牆相同。

三、適切性分析

- (一) 造型模板混凝土護岸為近幾十年來最常使用於水流流速快、沖擊力大，溪岸容易坍塌危及附近農地或聚落溪段。
- (二) 造型模板混凝土護岸可以營造天然溪流環境，以及增加護岸臨水面粗糙度，提供動、植物攀爬介面。當生態檢核發現有陸域生物會到溪邊覓食或繁衍時，需要檢視其行走路徑於正確位置增設足夠寬度、合適坡度之生物通道。階梯式生物通道則需視生物種類調整階梯高度。
- (三) 需要快速排水之窄淺型溪溝，不建議設計造型模板混凝土護岸。
- (四) 與擋土牆設計相同之是：岸頂背填土應略高於岸頂，以利排水；新舊或不同材質護岸宜平順銜接，避免突縮或突擴。
- (五) 與擋土牆設計不同之是：除了護岸基礎為岩盤外，需要避免護岸基礎淘刷。
- (六) 彎道凹岸處除了加深護岸基礎外，得採用丁壩、護腳、消能塊、蛇

籠等輔助保護。

- (七) 直線型河道可以採用標準斷面設計護岸。彎道水流直接沖擊處需要增加結構體強度以提高抗沖力。
- (八) 常流水之低水護岸以不設排水孔為原則；具有排水孔護岸之排水管應外斜，其背水面應設置級配排水袋防止背填土流出。
- (九) 當溪流鳥類或水域生物利用土堤作為棲息地時，不建議設計造型模板混凝土護岸。必要時依據生物習性規劃設計人工棲息環境。

第二節 乾砌石護岸

乾砌石護岸係以塊(卵)石疊砌而成之構造物，屬於重力式柔性結構體。如圖 2-3 所示。



圖 2-3 新北市金山區環湖三橋上游乾砌石護岸 一、布置原

則：

- (一) 適用於護岸背水面為高含水量土壤，或有高滲流水壓力產生管湧淘空破壞之虞區位。必要時，需要增加濾層厚度。
- (二) 因抗沖力較低，不適用於水流流速大於 6m/s、沖擊力大之溪流，或土石流潛勢溪流。
- (三) 結構體僅由塊石間圍砌密靠取得穩定，必須加強基礎穩定性，以防止不均勻沉陷。
- (四) 表面具有天然景觀，砌石縫隙之空間利於動物棲息及植物生長。

(五) 護岸長度每 10 米至 15 米應加設間隔牆一處。

二、本體設計：

- (一) 護岸高度：一般採用設計洪水位加上出水高為護岸高度，有效高在 4 公尺以下為原則。乾砌石長徑，即牆厚方向之石塊長度，應依序向上縮減，任一砌石（含本身）往上計算之高度均不宜超過該石材長徑之 5 倍；屬於重力式剛性結構體之漿砌石護岸高度則以不超過石材長徑 6.5 倍為原則。同時，可視實際需要在護岸上方設計植生岸坡，但是需要計入加載重量。依據水土保持技術規範，護岸設計洪水量以重現期距 50 年之降雨強度計算。
- (二) 臨水面坡度：配合原有岸坡坡度，並考慮水、陸域生態通道坡度設計。牆面坡度以小於 1:0.3 為原則。多階護岸具有親水功能，以及利於兩棲生物遷移和棲息。
- (三) 基礎深度：以砌石擋土牆設計之安定檢討成果為基礎，再配合尖峰流量與流速所推算之沖刷深度設計基礎深度。彎道凹岸處之基礎深度會較其餘河段深。砌石護岸如採用鋼筋混凝土基礎，不僅可以承載塊(卵)石重量，也可防止不均勻沉陷。漿砌石護岸對水流之抗沖力較佳。砌石下部半埋於混凝土中，而上部砌石間之縫隙則利於動物棲息與植物生長，也可保護河岸坡趾免受淘刷破壞以防止構造物不均勻沉陷。岸趾拋石可以增加生物棲息空間。
- (四) 彎道處理：同混凝土護岸之彎道處理。
- (五) 安定檢討與砌石擋土牆相同。
- (六) 如砌石背後為混凝土擋土牆，則視同砌石材質之混凝土護岸。

三、適切性分析

- (一) 乾砌石護岸之抗沖力較低，不適用於水流流速快、沖擊力大之溪流，或土石流潛勢溪流。
- (二) 乾砌石護岸排水能力強，適用於護岸背水面為高含水量土壤，或有高滲流水壓力產生管湧淘空破壞之虞區位。
- (三) 乾砌石重力式護岸之臨水面坡度需大於 1:0.3，以滿足擋土牆巨積體之假設條件。小於 1:0.3 臨水面鋪設坡度之砌石功能為岸坡覆蓋保護，塊石重量需大於水流啟動力。
- (四) 沒有大卵石或塊石之河溪環境，不建議外購卵石或塊石構築砌石護岸。
- (五) 砌石縫隙利於植物生長。當生態檢核發現有陸域生物會到溪邊覓食或繁衍時，需要檢視其行走路徑於正確位置增設足夠寬度、合適坡度之生物通道。階梯式生物通道則需視生物種類調整階梯高度。
- (六) 當溪流鳥類或水域生物利用土堤作為棲息地時，不建議設計砌石護岸。必要時依據生物習性規劃設計人工棲息環境，如圖 2-4 所示。混凝土基礎之砌石護岸務必依照生態檢核成果，依據水域生物習性規劃設計人工棲息環境。
- (七) 如砌石背後為混凝土擋土牆，則視同砌石材質之混凝土護岸。



圖 2-4 新竹東興圳營造翠鳥棲地

第三節 生態槽混搭造型模板護岸

生態槽護岸係利用預鑄槽體中空之設計，以現地野溪清疏後產生之土石就地回填所形成之構造物，屬於重力式柔性結構體。生態槽因為槽體填塞土壤，為避免土壤被流水沖走，經常設計在常流水位以上；常流水部分則設計造型模板鋼筋混凝土護岸。如圖 2-5 所示。



圖 2-5 崎林橋上游生態槽混搭造型模板護岸

資料來源：農業部/獎項專區/優良農業建設工程獎網站

一、布置原則：

- (一) 適用於生態豐富與多樣化之溪流，復育濱溪植物生長與水陸域生態棲息環境。因槽體充填土壤或卵石，容易受水流淘空，不適用於水流流速大於 6m/s、沖擊力大之溪流或土石流潛勢溪流，因此，生態槽應布置於常水位以上，常水位以下則以造型模板混凝土等抗沖力強之材料為主。

- (二) 結構體僅由預鑄槽體堆疊而成，必須加強卡榫之抗剪力與基礎強度，以防止剪裂破壞與不均勻沉陷。
- (三) 表面仿天然岩石設計，粗糙面有利動、植物攀爬。

二、本體設計：

- (一) 護岸高度：一般採用設計洪水位加上出水高為護岸高度，有效高在 4 公尺以下為原則，生態槽混搭造型模板護岸設計高度可以比照造型模板混凝土護岸高度設計。同時，可視實際需要在護岸上方設計植生岸坡，但是需要計入加載重量。依據水土保持技術規範，護岸設計洪水量以重現期距 50 年之降雨強度計算。
- (二) 臨水面坡度：臨水面坡度設計需要考慮水、陸域生態通道坡度，以及水、陸域生態棲地環境復育。造型模板混凝土護岸之臨水面坡度配合原有臨水面坡度設計；生態槽部分之牆面坡度則以小於 1:0.3 為原則。多階護岸有利於兩棲生物遷移和棲息。
- (三) 基礎深度：依據造型模板混凝土護岸或造型模板鋼筋混凝土護岸之類型，以重力式或半重力式擋土牆設計之安定檢討步驟，計算生態槽之加載重量後，再配合尖峰流量與流速所推算之沖刷深度設計護岸基礎深度。彎道凹岸處之基礎深度會較其餘河段深。其他基礎保護措施可以比照造型模板混凝土護岸方式處理。
- (四) 彎道處理與岸線：同造型模板混凝土護岸之彎道處理。
- (五) 依據造型模板混凝土護岸或造型模板鋼筋混凝土護岸之類型，以重力式或半重力式擋土牆設計之安定檢討步驟，計算生態槽之加載重量後，從事安定檢討分析。

三、適切性分析

- (一) 生態槽護岸之抗沖力較低，不適用於水流流速快、沖擊力大之溪流，或土石流潛勢溪流。因此，生態槽建議布置於常水位以上，常水位以下則以造型模板混凝土等抗沖力強之材質為主。
- (二) 適用於生態豐富與多樣化之溪流，復育濱溪植物生長與水陸域生態棲息環境。當生態檢核發現有陸域生物會到溪邊覓食或繁衍時，需要檢視其行走路徑於正確位置增設足夠寬度、合適坡度之生物通道。階梯式生物通道則需視生物種類調整階梯高度。
- (三) 依據彎道曲率半徑大小選擇合適寬度之槽體，曲率半徑小之彎道應選擇寬度較小之槽體。曲率半徑太小之彎道則不建議採用此類型護岸。
- (四) 當溪流鳥類或水域生物利用土堤作為棲息地時，不建議設計生態槽護岸。必要時依據生物習性規劃設計人工棲息環境。
- (五) 生態槽體需要開設排水孔，避免積水影響植物生長。為防止土砂經由排水孔沖刷流失，槽體內排水孔入口處應設置不織布或級配排水袋。栽植植物之根徑和根系長度、分布型態宜配合槽體大小。
- (六) 工地附近有足夠大小之槽體澆注空間與合適之運輸道路寬度與坡度才選擇預鑄槽體之施工方式，以發揮預鑄工法縮短工期之優點。
- (七) 宜盡速訂定預鑄槽體及其卡樁、凹槽等之結構力學(抗剪力、抗沖擊力、抗磨蝕力...等)參數之國家設計標準。
- (八) 宜盡速訂定預鑄槽體收邊處理之施工規範和驗收標準。

第三章 持續進行野溪樣區水文觀測

針對農村水保署近年選定之三處觀測溪流點位(猴猴坑溪、福德坑溪、打鐵坑溪)持續辦理現地水文資料觀測。其中，蘇澳猴猴坑溪為造型模板護岸、頭城福德坑溪為乾砌石護岸、龍潭打鐵坑溪則為生態槽混搭造型模板護岸。

第一節 研究樣區選擇條件

延續111年選定之三處觀測溪流點位(猴猴坑溪、福德坑溪、打鐵坑溪)持續觀測雨量和水位。其中，蘇澳猴猴坑溪為造型模板護岸、頭城福德坑溪為乾砌石護岸、龍潭打鐵坑溪則為生態槽混搭造型模板護岸。由於大部分野溪沒有設置水位流量站，無法直接取得流量與水位資料，因此，本計畫以三個條件選擇研究樣區：

- 一、樣區河段上、下游端有跌水發生，可以量測臨界水位推估流量；
- 二、樣區河段順直、河床平整，沒有槽線，突擴、突縮斷面；
- 三、樣區河段為造型模板、砌石或生態槽混搭造型模板等護岸類型。

本年度之雨量與水位資料將依據農村水保署數值資料標準格式範本上傳農村水保署水砂觀測相關系統。同時，每個月以及颱風豪雨過後會到現場維護確保儀器設備安全。

猴猴坑溪與福德坑溪樣區河段之河床質均勻度高；打鐵坑溪樣區河段底床均勻度雖然沒有猴猴坑溪和福德坑溪高，屬於穩定不易變動之非均勻河床，三樣區之河床粗糙係數可以視為定值。猴猴坑溪之河床與護岸狀態穩定；福德坑溪及打鐵坑溪之河段寬度較大，雖然兩處樣區於5年計畫期間之濱溪植物生長狀態增加河灘地之粗糙係數，由於計畫執行期間降雨量小，大部分水位都位於河槽內，沒有擴及到河灘地範圍，濱溪植物之生長對

複合式粗糙係數估算影響不大；當降雨量大時，濱溪植物是會導致粗糙係數估算產生誤差原因之一。打鐵坑溪之預鑄生態槽都位於設計洪峰水位以上，因此，這些年之水位都在造型模板混凝土護岸範圍內。

第二節 研究樣區介紹

一、猴猴坑溪

猴猴坑溪位於宜蘭縣蘇澳鎮，為蘇澳溪支流，發源於南蘇澳山。猴猴坑溪上游有一座固床工可以做為流量觀測使用，以該座固床工為集水點時，集水區面積為 266.93 公頃，河道長度 3,296 公尺，河道平均坡度為 5.16%。猴猴坑溪水質清澈、河道蜿蜒，自版橋下游有一段造型模板之順直護岸，可以做為水位觀測使用。如果以版橋下游端為集水點時，集水區面積為 298.19 公頃，河道長度 3,934 公尺，河道平均坡度較緩，為 4.58%。

二、福德坑溪

福德坑溪位於宜蘭縣頭城鎮，為得子口溪支流，發源於鶯子頂山。以吉祥橋為集水點時，集水區面積為 861.88 公頃，河道長度 3,999 公尺，河道平均坡度為 10.00%。以農業部農田水利署宜蘭管理處所設置渠首工最下游處之固床工作為流量觀測點，緊接著下游處之乾砌石順直護岸將作為觀測水位使用。由於福德坑溪已經設置渠首工取水，因此以樣區河段實際觀測流量和水位推估護岸之粗糙係數。

三、打鐵坑溪

打鐵坑溪位於桃園市龍潭區，又稱清水坑溪，為大漢溪支流，發源於龍潭區石門山（小竹坑山），集水區面積為 581.41 公頃。本計畫以石門大圳櫻花隧道起點之渡槽為集水點，取該點與上游處打鐵坑橋間之生態槽混搭造型模板護岸為樣區河段。以該河段下游處疊式上拱型固床工上方之直線型固床工為流量觀測點。如果以石門大圳渡槽為集水點時，集水區面積為 581.41 公頃，河道長度 4,262 公尺，河道平均坡度為 4.79%。由於農業部農田水利署石門管理處除了自石門水庫取水，以渡槽通過打鐵坑溪外，也同時於打鐵坑橋設置渠首工取水注入石門大圳。因此，僅能以樣區河段實際

觀測流量和水位資料推估護岸之粗糙係數。研究樣區基本資料如表 3-1 所示。

表 3-1 研究樣區基本資料

集水區名稱	集水點	集水區面積 (ha)	河道長度 (m)	河道平均坡度 (%)
猴猴坑溪	上游固床工	266.93	3,296	5.16
	版橋下游點	298.19	3,934	4.58
福德坑溪	吉祥橋	861.88	3,999	10.00
打鐵坑溪	石門大圳渡槽	581.41	4,262	4.79

圖 3-1、圖 3-2 和圖 3-3 分別為猴猴坑溪、福德坑溪和打鐵坑溪集水區圖。



圖 3-1 猴猴坑溪集水區

第三節 水文觀測設備

一、雨量計

本計畫選擇於樣區適當空曠位置架設傾斗式雨量計如圖 3-4 所示。測原理為雨水經由直徑 200 mm 之承雨器流入精度 0.2mm 傾斗杯，到達一定雨量時，傾斗杯傾倒且同時帶動磁簧開關並輸出脈衝信號存於記憶體晶片中，可連接記錄器和電腦傳輸使用。UT-R0001 雨量計，主要包含承雨器、雨量計模組、太陽能模組、後端伺服器、資料庫以及前端顯示器。其中，雨量計精準度為 ± 2.0 mm/小時，電源設備為太陽能搭配鋰電池，雨量計模組與後端伺服器以 IoT 網路之方式連接，且後端伺服器分別與資料庫及前端顯示器連接，外殼為抗紫外線耐候 ABS 塑膠，防水防塵為 IP67 等級。UT-R0001 雨量計規格參數如表 3-2 所示。

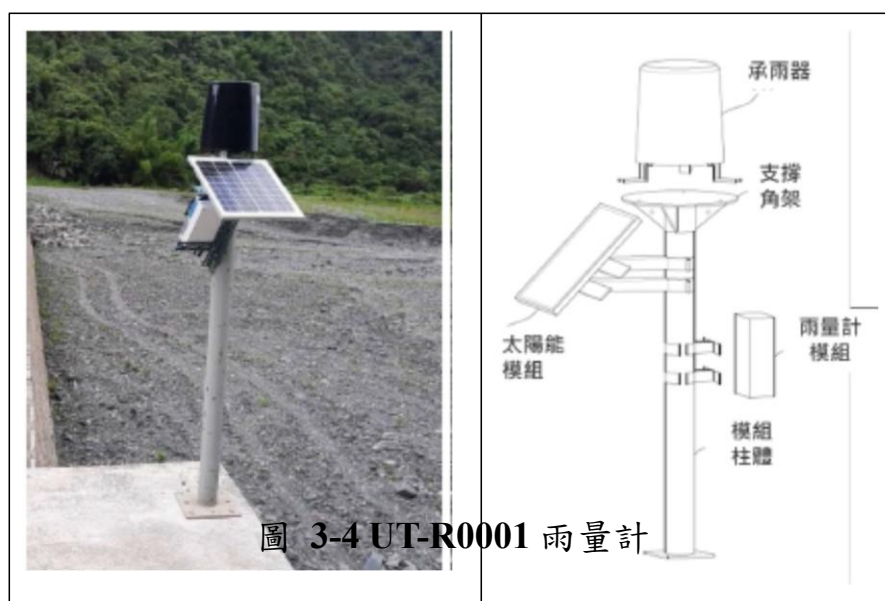


圖 3-4 UT-R0001 雨量計

表 3-2 雨量計規格參數

規格參數	說明
精準度	±2.0/hr
解析度	0.2mm
操作溫度	-40~85°C
儲存溫度	-40~125°C
濕度	0~100%
電源	5V~24VDC
承雨器直徑	200mm
型式	傾斗式
外殼材質	抗紫外線耐候 ABS 塑膠
資料傳輸頻率	1min/5min/10min
資料儲存(Flash)	1yr
電源設備	鋰電池/太陽能
防水防塵	IP67

二、水位計

本計畫使用之水位計主要包含水位偵測模組、通訊模組(NB-IoT/藍芽)、電源模組及資料儲存模組。其中水位偵測模組(如圖 3-5 所示) 量測範圍為 0.5~20 m，解析度為 0.5 mm。該水位計係物聯網科技之低耗能智慧水情盒，能夠遠端控制其傳輸頻率，電源設備為太陽能搭配鋰電池，水位計模組與後端伺服器以 IoT 網路之方式連接，且後端伺服器分別與資料庫及前端顯示器連接，外殼為抗紫外線耐候 ABS 塑膠，防水防塵為 IP67 等級。本計畫採用之水位計參數如表 3-3 所示。

本年度全部雨量計和水位計重新換裝，以達到擷取雨量和水位資料之即時傳輸功能。猴猴坑溪於 2025 年 6 月 23 日安裝好雨量計和臨界水位計，上下游水位計則於 7 月底完工後，8 月完成驗收後安裝好上下游水位計。福德坑溪於 6 月 24 日安裝好雨量計、臨界水位計和上下游水位計。打鐵坑溪則分別於 6 月 13 日和 20 日安裝好雨量計、臨界水位計和上下游水位計。

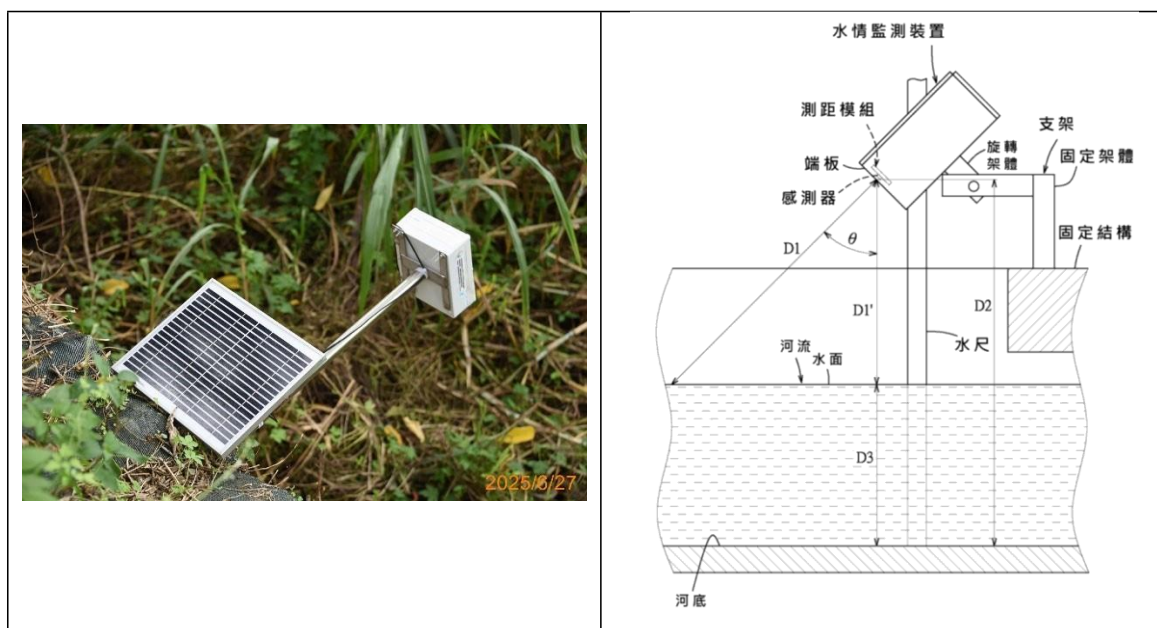


圖 3-5 水位計

表 3-3 水位計規格參數

規格參數	說明
感測方式	頻率調變連續波
水位量測範圍	0.5~20 m
量測解析度	0.5 mm
工作溫度範圍	-40~80°C
外觀尺寸	265 mm x 185mm x 95 mm
資料傳輸	NB-IoT/Cat-M1/BlueTooth/Wifi 2.4G/USB 1.1
資料傳輸頻率	1 min/5 min/10 min
資料儲存(Flash)	1 yr
電源設備	鋰電池/太陽能
防水防塵	IP67

第四節 水文觀測設備安裝

每一個研究樣區各設置一座雨量計和三座水位計，水文觀測設備安置地點如圖 3-6 所示。

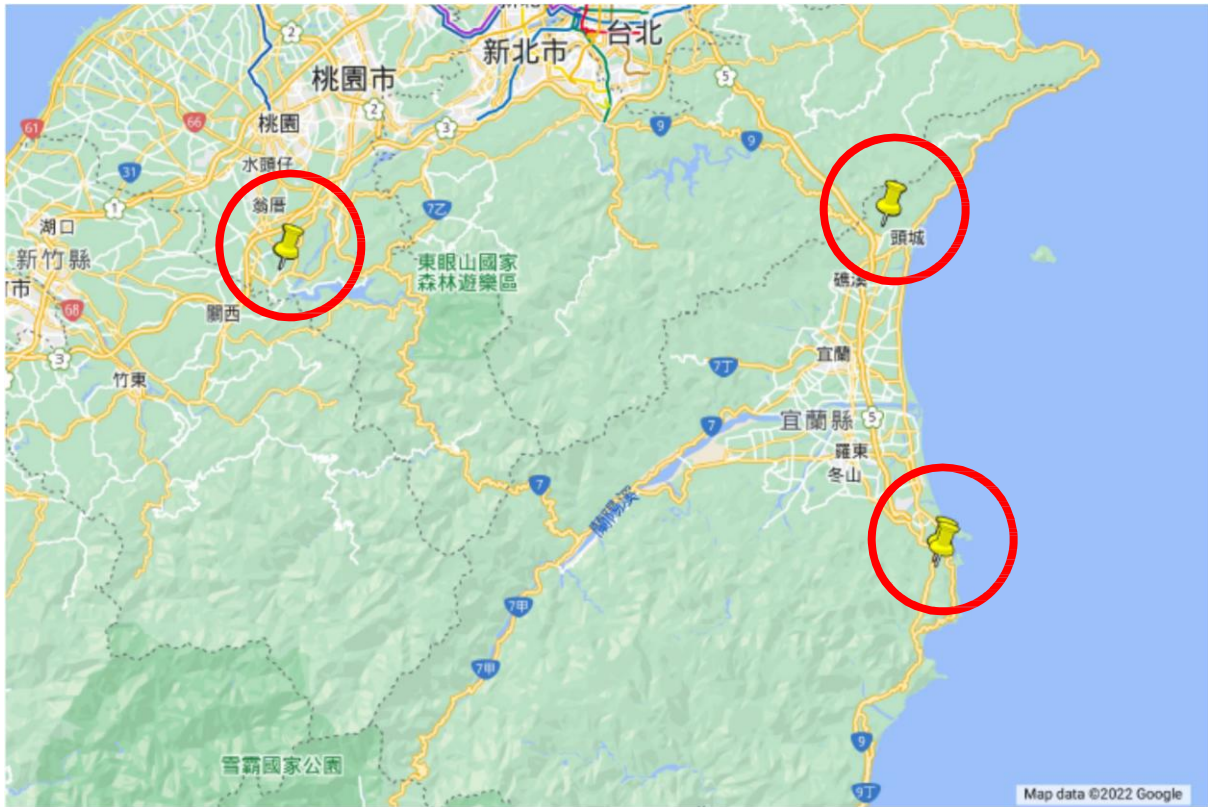


圖 3-6 水文觀測設備安裝地點位置圖

一、猴猴坑溪

猴猴坑溪水位計架設位置圖如圖 3-7 所示。圖中①為樣區下游端；②為臨界水位點。圖 3-8 為該研究樣區之雨量計、臨界水位計和上下游水位計。圖 3-9、圖 3-10 分別是猴猴坑溪上下游水位計通視圖與水位站斷面資料。新完工之猴猴坑溪觀測河段左岸為原有之舊造型模板護岸；右岸為光滑混凝土護岸。由於臨界水位計與觀測之上下游水位計間有一段距離，以實測流速和水位修正流量後，得到流量面積關係式如下。

$$Q(cm^2) = 1.63Q_{\frac{A_u}{A_c}} = 1.46 \frac{A_u}{A_c} Q_m = 1.46 \frac{298.19}{266.93} Q_m (3-1)$$

其中， Q_u, A_u ：猴猴坑上游水位站流量、集水面積；

Q_m, A_c ：猴猴坑臨界水位站流量、集水面積。



圖 3-7 猴猴坑溪水位計架設位置圖

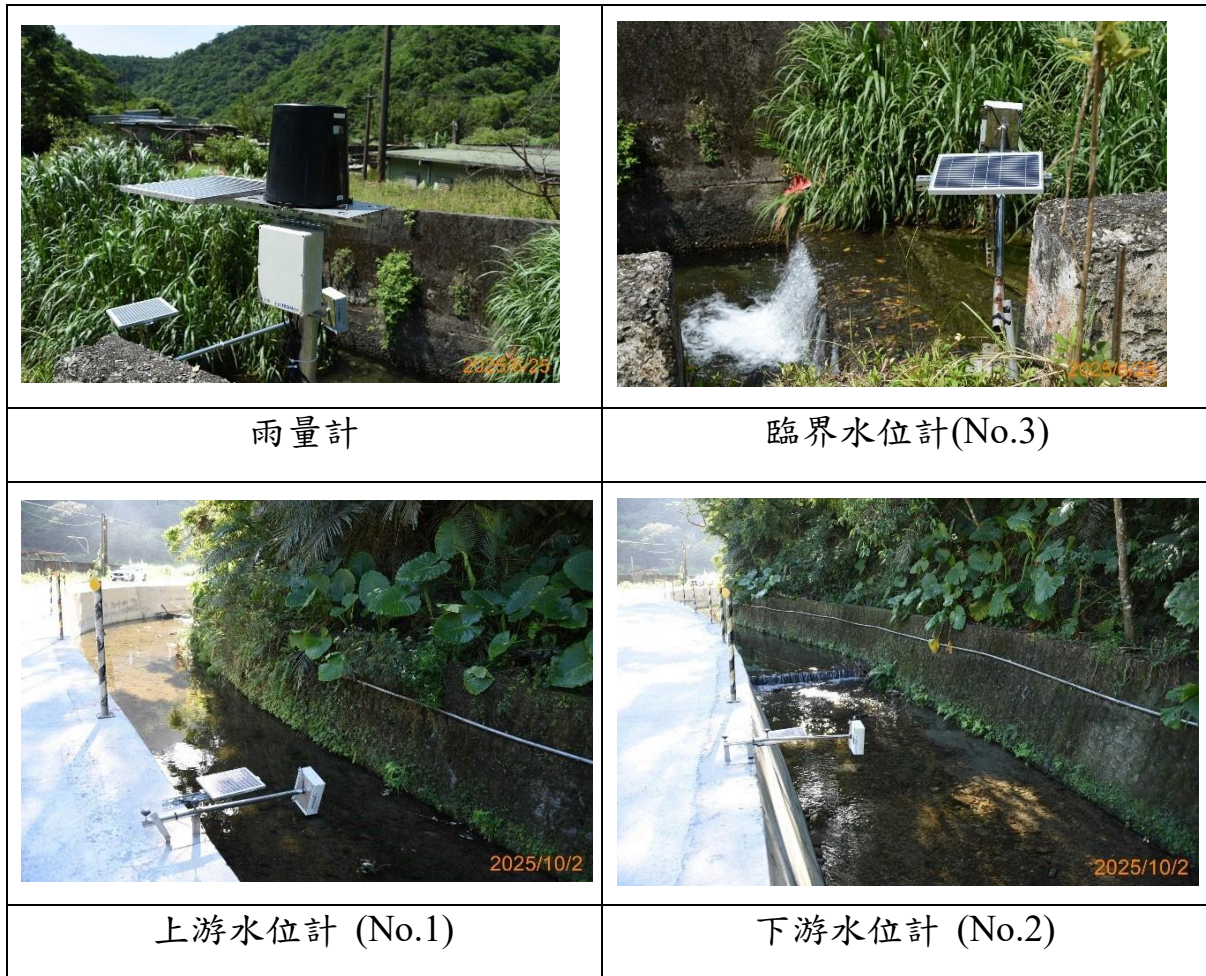


圖 3-8 猴猴坑溪水文觀測設備安裝

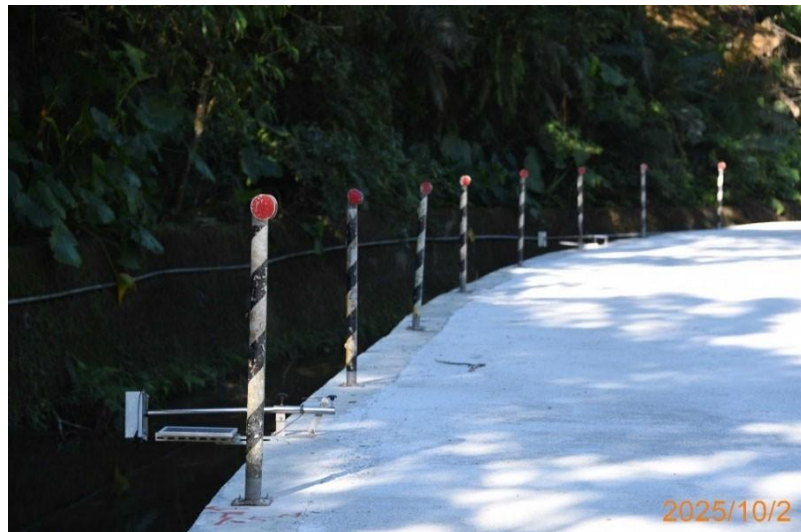


圖 3-9 猴猴坑溪上下游水位計通視圖

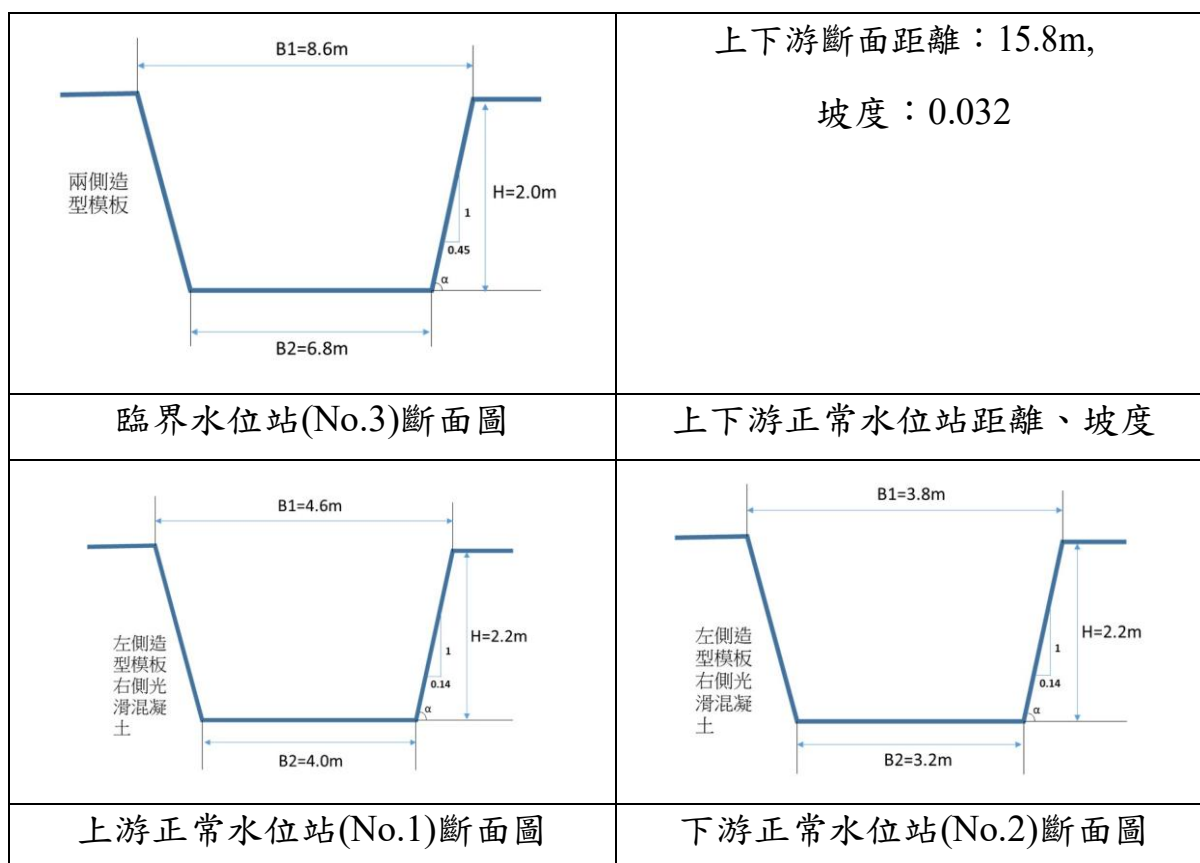


圖 3-10 猴猴坑溪水水位站斷面資料

114 年 4 月 1 日至 7 月 29 日期間，蘇澳鎮公所於猴猴坑溪河段進行護岸復建工程。上、下游水位計間之河段左岸維持原有之造型模板護岸；右岸 則為新建光滑鋼筋混凝土護岸。由於護岸材質改變，因此完工後之觀測資 料必須另行分析。2025 年 11 月 10-11 日受到鳳凰颱風外圍環流影響，暴雨沖壞水位計，如圖 3-11 所示。



圖 3-11 鳳凰颱風外圍環流沖壞猴猴坑溪水水位計

二、福德坑溪

福德坑溪水位計架設位置圖如圖3-12所示。圖中①為樣區下游端。圖3-13為該研究樣區之雨量計、臨界水位計和上下游水位計。由於福德坑溪有農田水利署設置渠首工取水(如圖3-14所示)，為了避免取水影響流量觀測，因此臨界水位計架設在渠首工下游處。水位站斷面資料則如圖3-15所示。由於臨界水位計和上下游水位計距離相近，臨界水位計之流量可以視為上游水位計流量，不需要再以流量面積法校正。

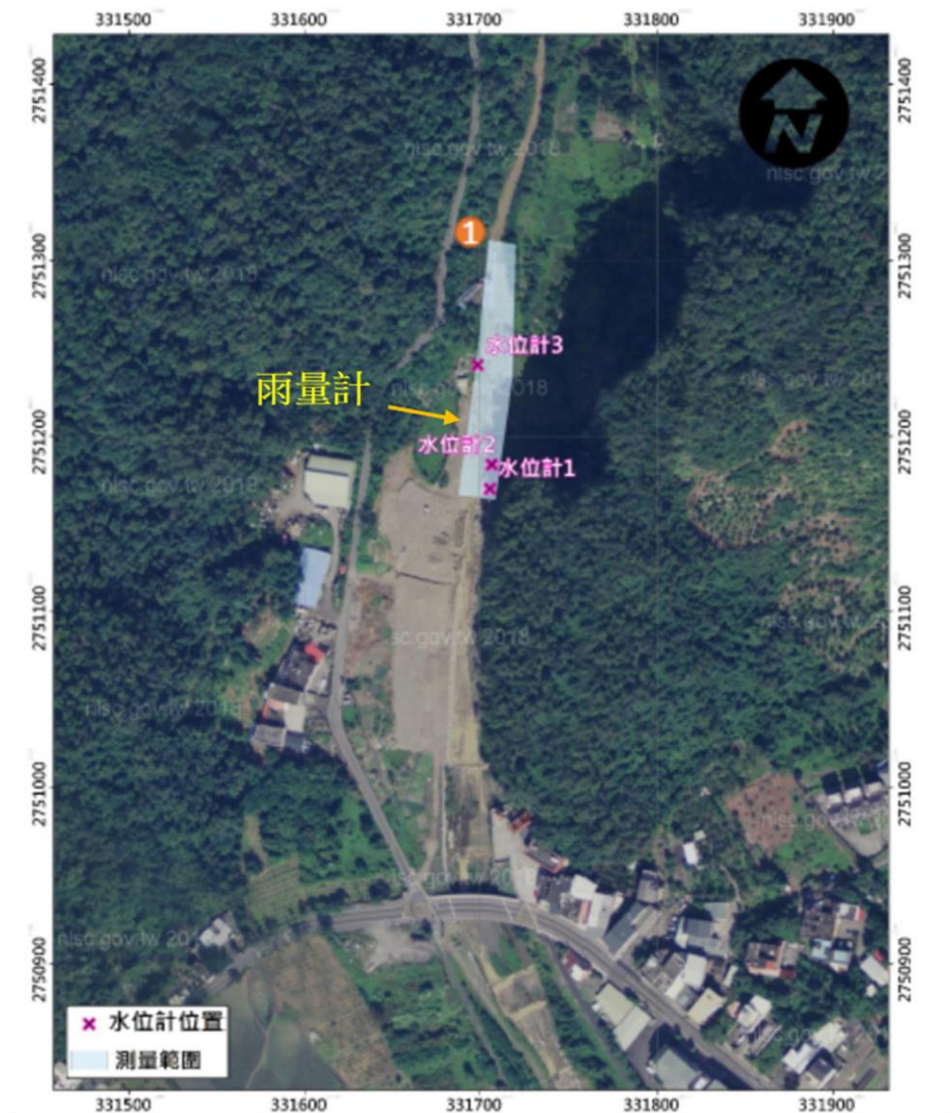


圖 3-12 福德坑溪水位計架設位置圖

	
雨量計	臨界水位計(No.3)
	
上游水位計(No.2)	下游水位計(No.1)

圖 3-13 福德坑溪水文觀測設備安裝



圖 3-14 福德坑圳渠首工

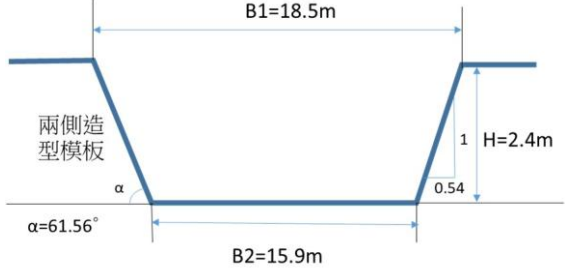
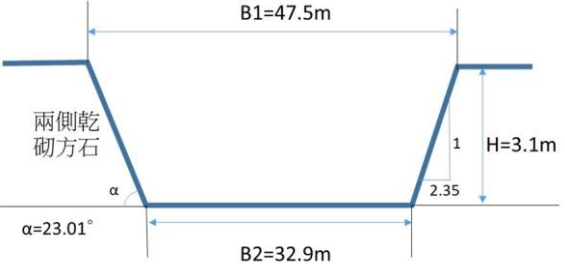
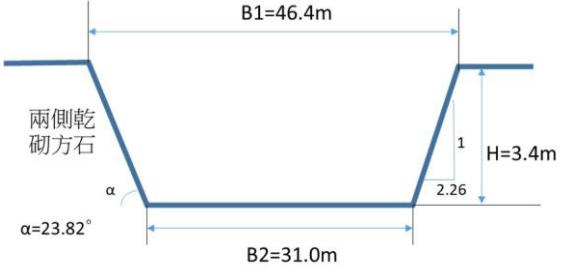
 兩側造型模板 $\alpha=61.56^\circ$ $B1=18.5m$ $B2=15.9m$ $H=2.4m$ 0.54	上下游斷面距離：15.8m, 坡度：0.038
臨界水位站(No.3)斷面圖	上下游正常水位站距離、坡度
 兩側乾砌方石 $\alpha=23.01^\circ$ $B1=47.5m$ $B2=32.9m$ $H=3.1m$ 2.35	 兩側乾砌方石 $\alpha=23.82^\circ$ $B1=46.4m$ $B2=31.0m$ $H=3.4m$ 2.26
上游正常水位站(No.2)斷面圖	下游正常水位站(No.1)斷面圖

圖 3-15 福德坑溪水位站斷面資料

三、打鐵坑溪

打鐵坑溪水位計架設位置圖如圖3-16所示。圖中①為樣區下游端。圖3-17 為該研究樣區之雨量計、臨界水位計、上下游正常水位計、臨界水位計和上下游正常水位計正視圖。水位站斷面資料則如圖 3-18 所示。由於臨界水位計和上下游水位計距離相近，臨界水位計之流量可以視為下游水位計流量，不需要再以流量面積法校正。



圖 3-16 打鐵坑溪水位計架設位置圖

	
雨量計	臨界水位計(No.1)
	
上游水位計(No.3)	下游水位計(No.2)

圖 3-17 打鐵坑溪水文觀測設備安裝

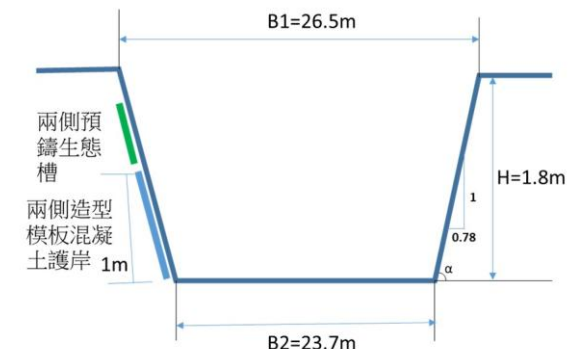
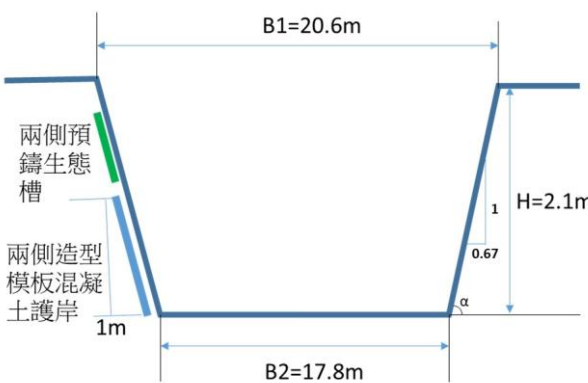
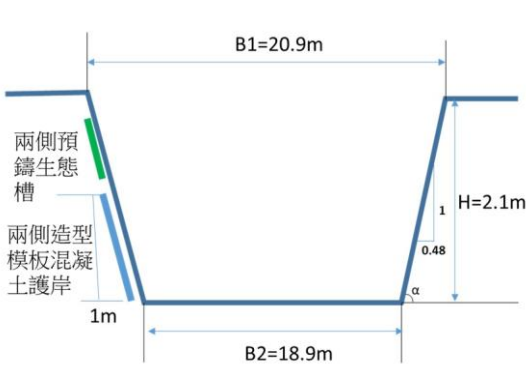
	上下游斷面距離：20m， 坡度：0.015
臨界水位站(No.1)斷面圖	上下游斷面距離、坡度
	
上游水位站(No.3)斷面圖	下游水位站(No.2)斷面圖

圖 3-18 打鐵坑溪水水位站斷面資料

四、候選研究樣區

依據臺北分署所提供之四處候選樣區，經過現勘後得到以下結論：如所示，北門坑溪兩側為土堤，有一座橋已經架設水位計，因為河道寬廣，沒有第二座橋也不容易自岸邊架設水位計，不予考慮作為樣區。猴洞坑溪兩側為乾砌石護岸，可以自岸邊架設水位計，位於河道彎曲段，沒有跌水可以量測臨界水位，不是理想樣區。小礁溪(橫圳段)兩側為土堤，可以自岸邊架設水位計，沒有跌水可以量測臨界水位，不是理想樣區。小礁溪一號橋上游兩側為造型模板護岸之系列固床工河段，。因為固床工間距過小，不易裝置水位計。圖3-19為候選樣區照片。



圖 3-19 候選樣區照片

第五節 水文觀測流程

水文觀測工作流程如圖 3-20 所示。

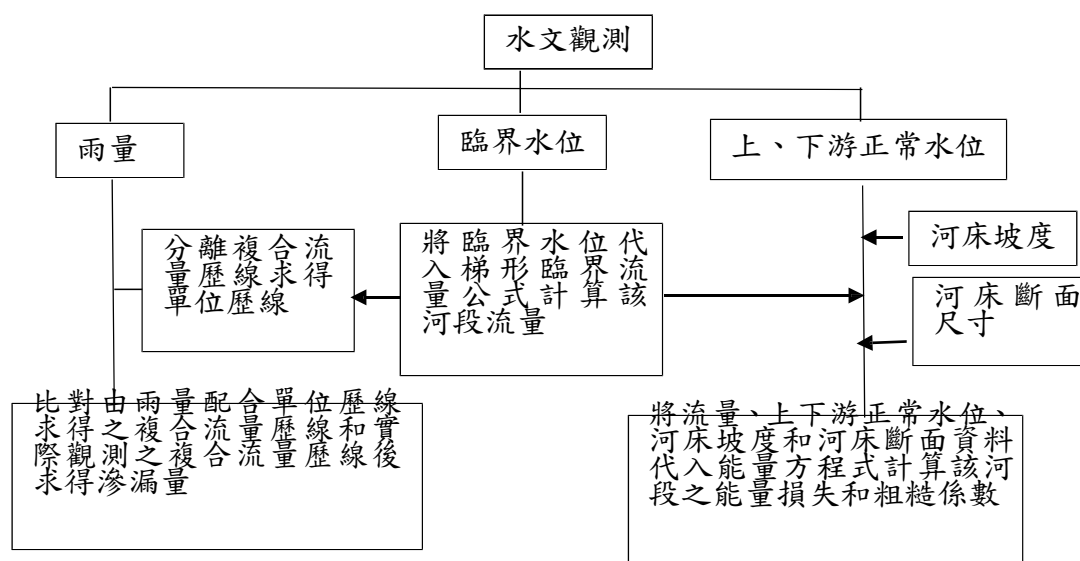


圖 3-20 水文觀測工作流程

本年度之雨量與水位資料將依據農村水保署數值資料標準格式範本上傳農村水保署水砂觀測相關系統。同時，每個月以及颱風豪雨過後會到現場維護確保儀器設備安全。

近年來因為小降雨事件較多，河寬幅度較大之福德坑溪和打鐵坑溪不僅水深經常無法擴展至左右兩岸，而且河床茅草每隔一段時間就覆蓋大部分河床，導致河床水位不易讀取或是沒有水位可以讀取，原先建議今年能夠更換至農村水保署推薦之其他更理想之河段持續觀測，經過這幾個月之踏勘，臺北分署建議之數條野溪河床寬度適中，有常流水；但是河道蜿蜒或固床工過於密集，無法作為試驗樣區使用。未來將持續原有三試驗樣區觀測，並繼續尋找合適樣區。

一、雨量水位分析 為了解研究樣區之降雨情形，彙整蘇澳、頭城和龍潭站之無因次降雨

強度公式參數、集水區參數、不同重現期距暴雨深度和最大日雨量、最大二

日雨量與年雨量如表 3-4、表 3-5、表 3-6 和表 3-7。3 研究樣區在 2021~2025(~11/27)年期間都有大於各該樣區 2 年重現期距、24 小時延時降雨量之降雨事件。

表 3-4 無因次降雨強度公式係數

站名	P	A	B	C	G	H
蘇澳	4326.6(1990~2025/11/27)	13.62215	55	0.531615	0.5579	0.301046
頭城	2288.4(2015~2025/11/27)	20.0536	455	0.614378	0.549044	0.306532
龍潭	2072.4(2014~2025/11/27)	20.31099	55	0.617134	0.548783	0.306697

資料來源：CODIS 氣候觀測資料查詢服務網站/水土保持技術規範

表 3-5 研究樣區集水區參數

樣區	集水面積(km ²)	逕流係數	設計流量(cms)	一日降雨延時重現期 2 年洪峰流量(cms)
猴猴坑	2.6693	0.65	67.66	8.59
福德坑	8.6188	0.75	237.12	23.92
打鐵坑	5.8141	0.7	137.46	14.06

表 3-6 不同重現期距之暴雨深度(毫米)

站名	2yr-24hr	2yr-1hr	5yr-1hr	10yr-hr	25yr-1hr	50yr-1hr
蘇澳	427.44	71.03	84.20	94.15	107.31	117.27
頭城	319.68	63.26	75.27	84.35	96.35	105.44
龍潭	298.56	61.65	73.41	82.31	94.07	102.97

表 3-7 最大日雨量、最大二日雨量和年雨量表

雨量站	年度(年)	最大日降雨量 (mm/m/d)	最大二日降雨量 (mm/m/d)	年雨量 (mm)
蘇澳-	2021	134mm/09/12	173mm/09/11-12	3,233
	2022	216mm/10/31	313mm/01/21-22	6,561
	2023	182mm/09/06	219mm/10/09-10	3,890.5
	2024	324mm/10/24	416mm/10/24-25	3,773
	2025(~11/27)	648.5mm/11/11	772mm/11/10-11	4,197.5
頭城	2021	91mm/09/12	129mm/07/23-24	2,033.5
	2022	126mm/10/16	172mm/01/21-22	3,037.5
	2023	124mm/06/09	186mm/06/09-10	1,825
	2024	174mm/09/22	217mm/09/22-23	2,254.5
	2025(~11/27)	170.5mm/11/11	242.5mm/11/10-11	2,050
龍潭	2021	172mm/08/07	208mm/07/22-23	1,922
	2022	136mm/09/02	205mm/09/11-12	3,087.5
	2023	116mm/05/19	117mm/05/19-20	1,771
	2024	86mm/07/24	130mm/07/24-25	1,766.5
	2025(~11/27)	194mm/10/20	307.5/10/20-21	2,490.5

資料來源：CODIS 氣候觀測資料查詢服務網站

(一) 猴猴坑溪

將 2021~2025 年 11 底間猴猴坑溪所觀測之雨量和水位資料分別繪製如圖 3-21。5 年期間最大年雨量發生於 2022 年，為 6,561 毫米；最大日雨量為 648.5 毫米（發生於 2025/11/11）；最大二日雨量為 772 毫米（發生於 2025/11/10-11）。2021~2025 年 11 底間之年雨量分別為 3,233、6,561、3,890.5、3,773 和 4,197.5 毫米；最大日雨量分別為 134、216、182、324 和 648.5 毫米；最大二日雨量則為 173、313、219、416 和 772 毫米。

(二) 福德坑溪

將2021~2025年11底間福德坑樣區所觀測之雨量和水位資料分別繪製如圖 3-22。5年期間最大年雨量亦發生於2022年，但比蘇澳站小，為3,037.5毫米；最大日雨量為174毫米(2024/09/22)；最大二日雨量為242.5毫米(發生於2025/11/10-11)。2021~2025年11底間之年雨量分別為2,033.5、3,037.5、1,825、2,254.5和2,050毫米；最大日雨量分別為91、126、124、174和170.5毫米；最大二日雨量則為129、172、186、217和242.5毫米。

(三) 打鐵坑溪

將2021~2025年11底間打鐵坑樣區所觀測之雨量和水位資料分別繪製如圖 3-23。5年期間最大年雨量亦發生於2022年，介於蘇澳站和頭城站之間為3,087.5毫米；最大日雨量為194毫米(2025/10/20)；最大二日雨量為307.5毫米(發生於2025/10/20-21)。2021~2025年11底間之年雨量分別為1,922、3,087.5、1,771、1,766.5和2,490.5毫米；最大日雨量分別為172、136、116、86和194毫米；最大二日雨量則為208、205、117、130和307.5毫米。

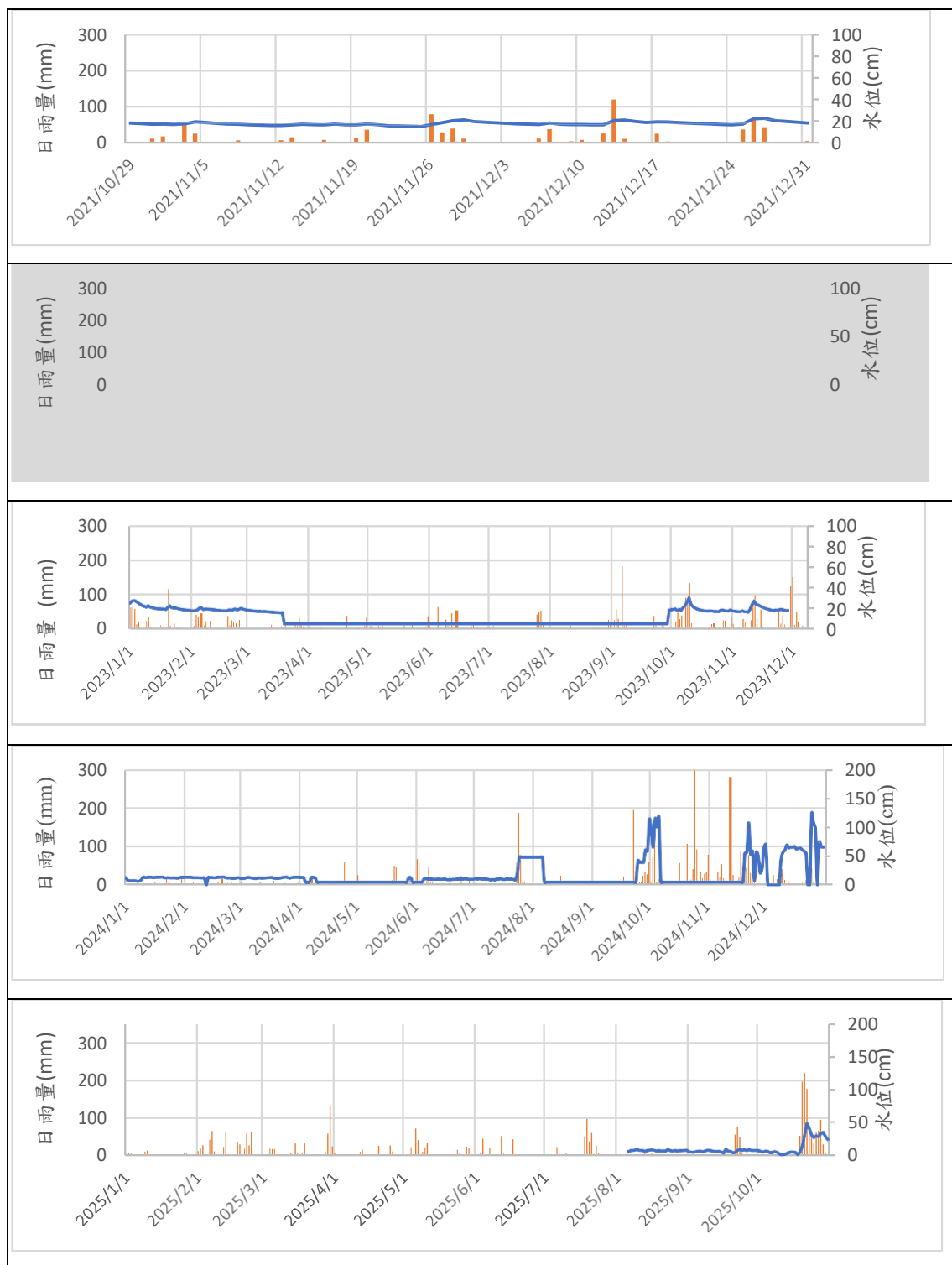


圖 3-21 猴猴坑之雨量與水位紀錄(2021~2025 年)

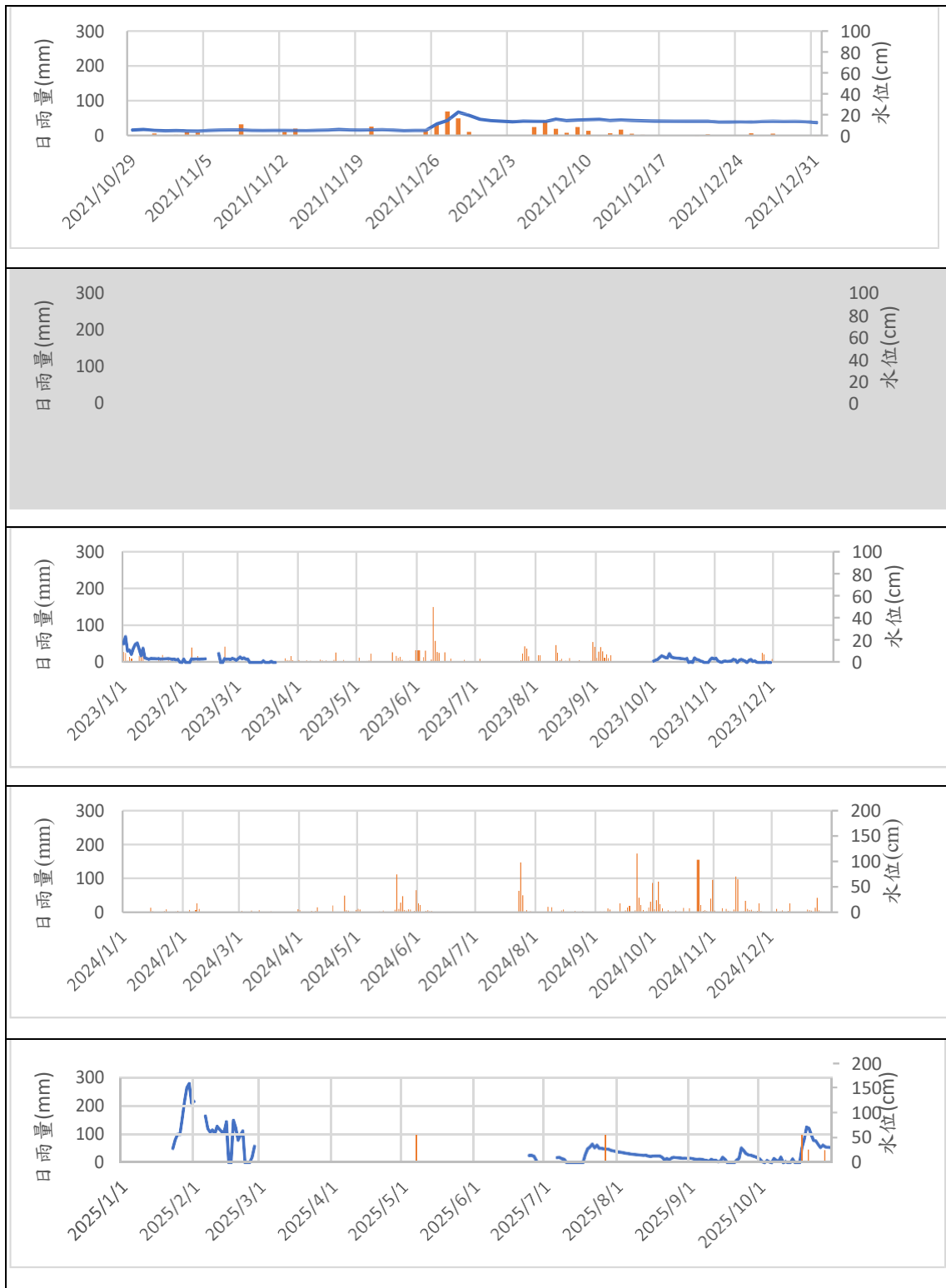


圖 3-22 福德坑之雨量與水位紀錄(2021~2025 年)

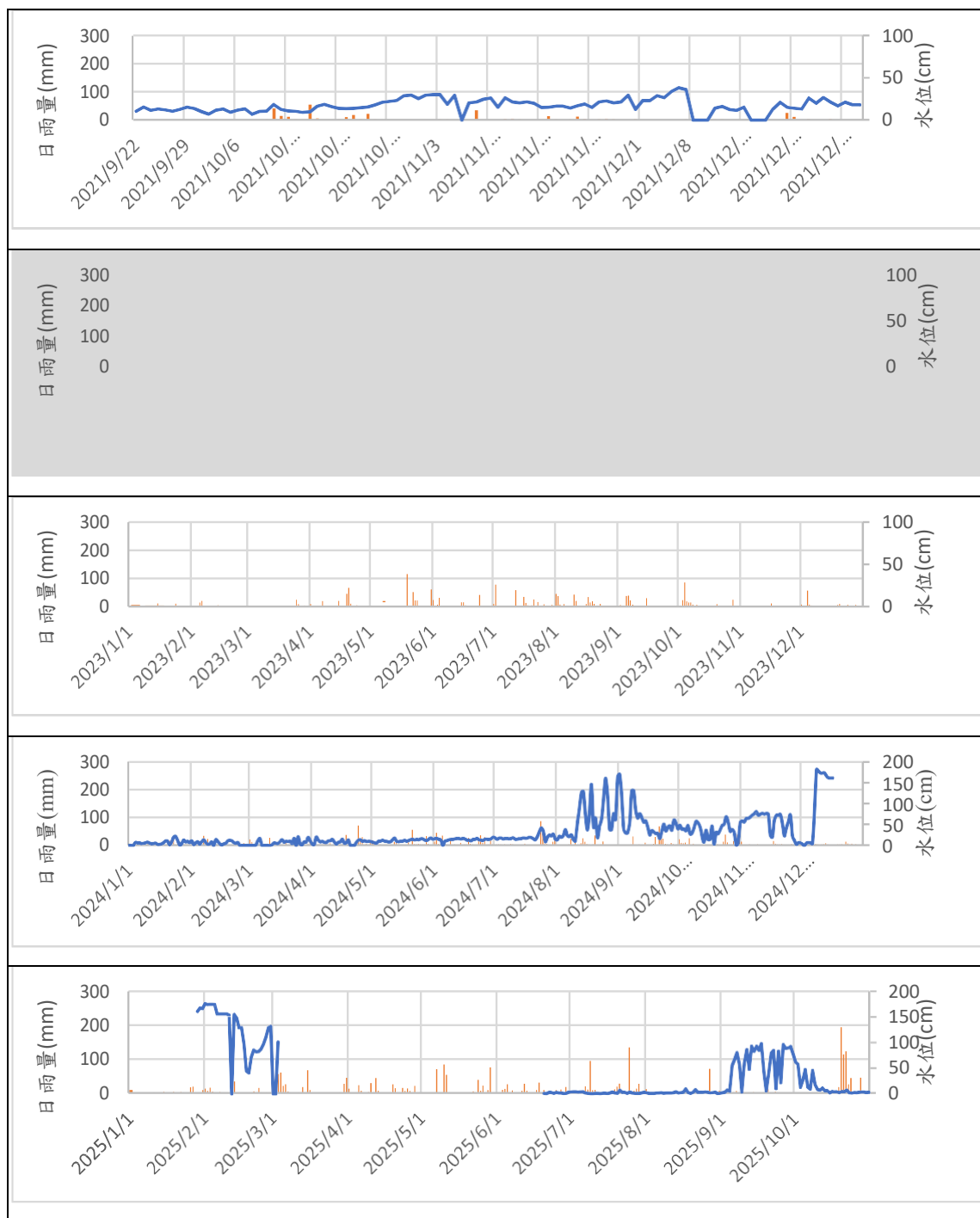


圖 3-23 打鐵坑之雨量與水位紀錄(2021~2025 年)

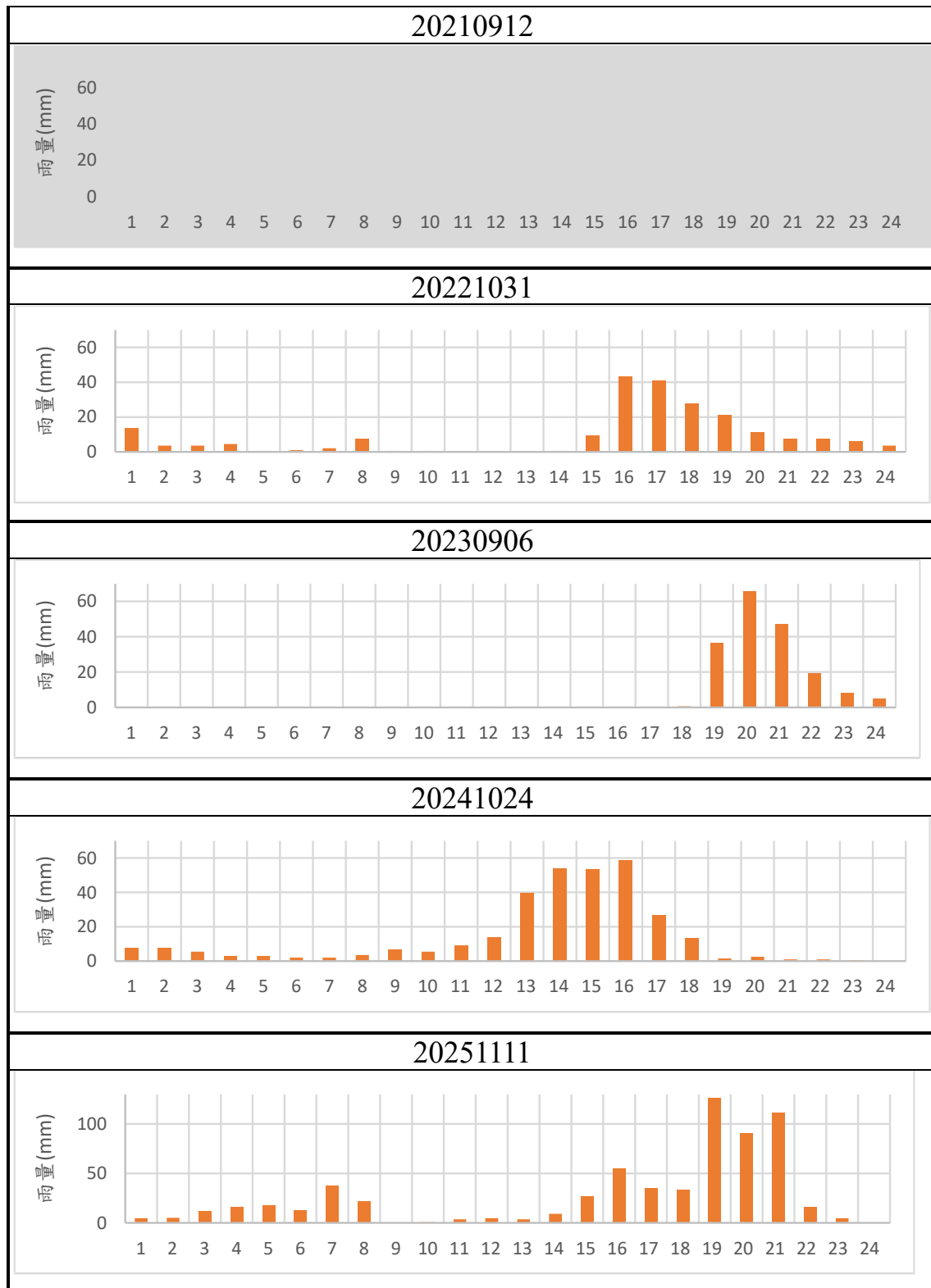


圖 3-24 蘇澳最大日降雨量事件雨量組體圖

資料來源：CODIS 氣候觀測資料查詢服務網站

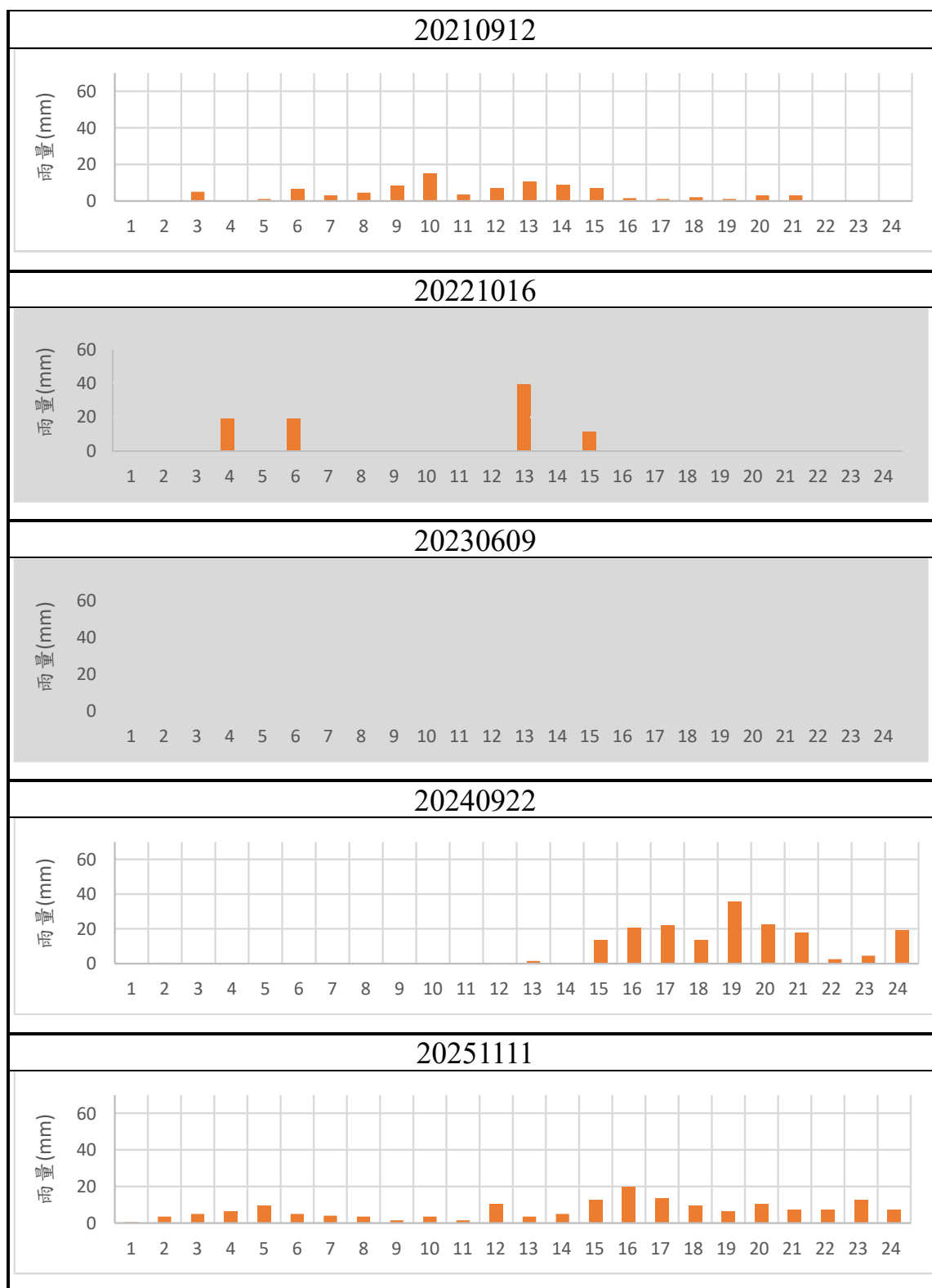


圖 3-25 頭城最大日降雨量事件雨量組體圖

資料來源：CODIS 氣候觀測資料查詢服務網站

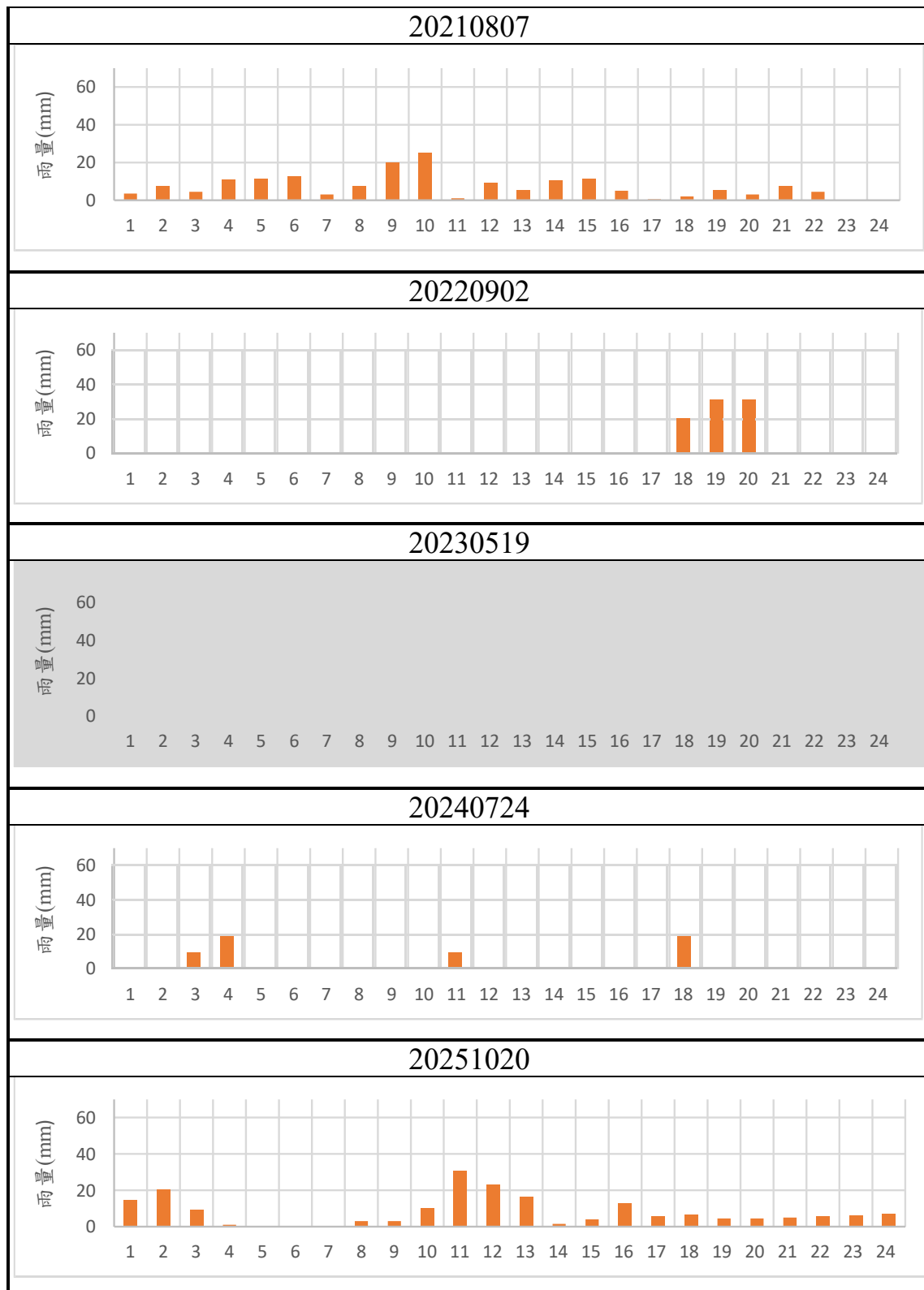


圖 3-26 龍潭最大日降雨量事件雨量組體圖

資料來源：CODIS 氣候觀測資料查詢服務網站

將 5 年間最大日雨量事件繪製降雨量組體圖，如圖 3-24、圖 3-25 和圖 3-26 所示。蘇澳站 5 年間最大日降雨量事件之最大時雨量分別為 27、43.5、65.5、59 和 126.5 毫米。頭城站 5 年間最大日降雨量事件之最大時雨量分別為 15、40.5、62.5、35.5 和 20 毫米。龍潭站 5 年間最大日降雨量事件之最大時雨量分別為 25、31.5、48.5、20 和 30.5 毫米。

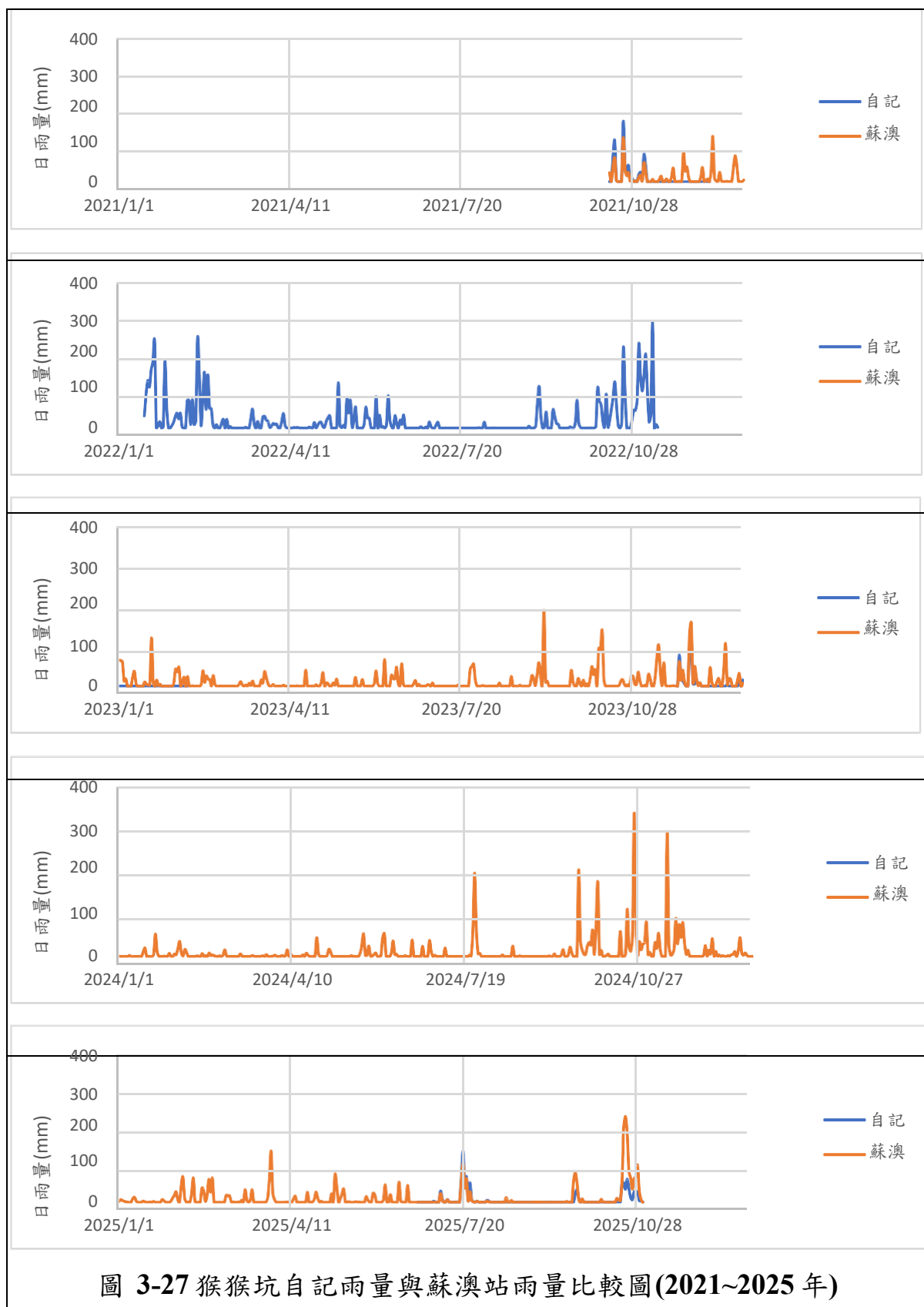
蘇澳 2021 年 9 月 12 日之降雨分布較均勻，尖峰降雨發生在 9 時；其餘 4 年之尖峰降雨都發生在中午以後，其中，2022、2023、2024 和 2025 年降雨集中在傍晚和晚上；2022 年 10 月 31 日之尖峰降雨發生在 16 時；2023 年 9 月 6 日則發生在 20 時，2024 年 10 月 24 日則是全日降雨，尖峰降雨發生在 16 時，2025 年 11 月 11 日之尖峰降雨發生在 19 時。

頭城 2021 年 9 月 12 日之降雨分布較均勻，尖峰降雨發生在 10 時；2022 年 10 月 16 日有兩集中降雨區，第一區位於 1-7 時；尖峰降雨發生在 6 時；第二區位於 11-18 時，降雨較大，尖峰降雨發生在 13 時，也是當日尖峰降雨量。2023 年 6 月 9 日為短延時強降雨事件，降雨時間集中在 12-19 時，尖峰降雨位於 13 時。2024 年 9 月 22 日之降雨集中在下午以後，尖峰降雨位於 19 時，2025 年 11 月 11 日之尖峰降雨發生在 16 時。

龍潭 2021 年 8 月 7 日、2022 年 9 月 2 日和 2024 年 7 月 24 日之降雨分布較均勻，其尖峰降雨分別位於 10 時、20 時和 18 時。2023 年 5 月 19 日之降雨集中在凌晨，降雨時間集中在 1-10 時，尖峰降雨位於 3 時，2025 年 10 月 20 日之尖峰降雨發生在 11 時。

自圖 3-27、圖 3-28、圖 3-29 和圖 3-30 知，猴猴坑在 2021~2025 年除了部分小於 60mm 之自記雨量與蘇澳站相符外，其餘皆小於蘇澳站雨量。福德坑與猴猴坑類似，但是小於 90mm 之自記雨量與頭城站雨量更為符合，高降雨量則小於頭城站雨量。打鐵坑小於 28mm 之自記雨量與龍潭站雨量較為符合外，其餘都小於龍潭站雨量。

經過 t-test 檢驗，猴猴坑和福德坑之 t 值分別為 6.742 和 6.741；超過 5%顯著水準之 1.645，表示兩研究樣區之自記雨量計分別和蘇澳、頭城雨量站雨量資料有明顯差異，必須以自行架設雨量計之雨量資料為準，無法直接取用氣象署既有雨量站資料。打鐵坑之 t 值為-1.208，與龍潭站無差異，表示可以直接取用氣象署既有龍潭雨量站資料。



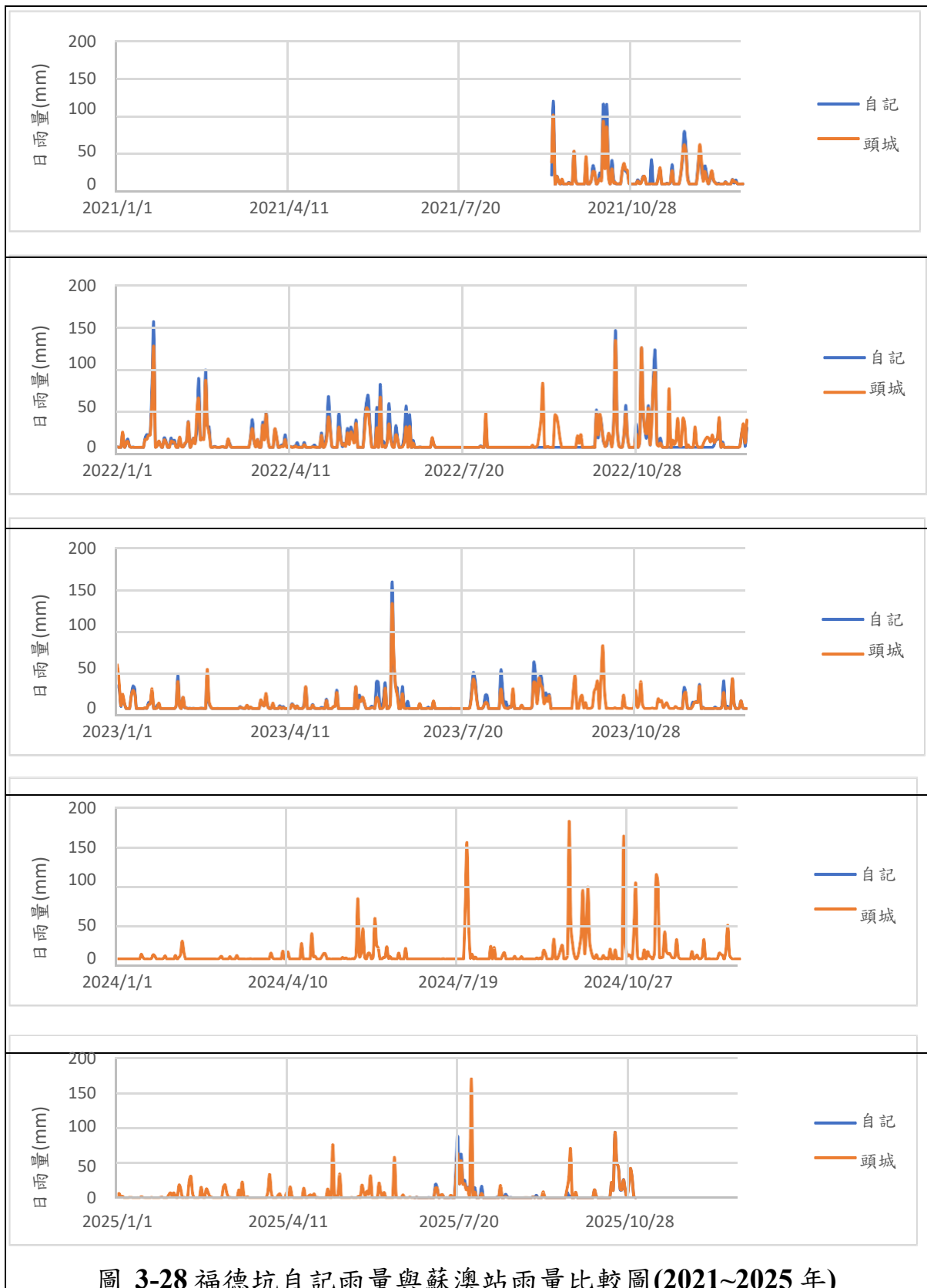


圖 3-28 福德坑自記雨量與蘇澳站雨量比較圖(2021~2025 年)



圖 3-29 打鐵坑自記雨量與蘇澳站雨量比較圖(2021~2025 年)

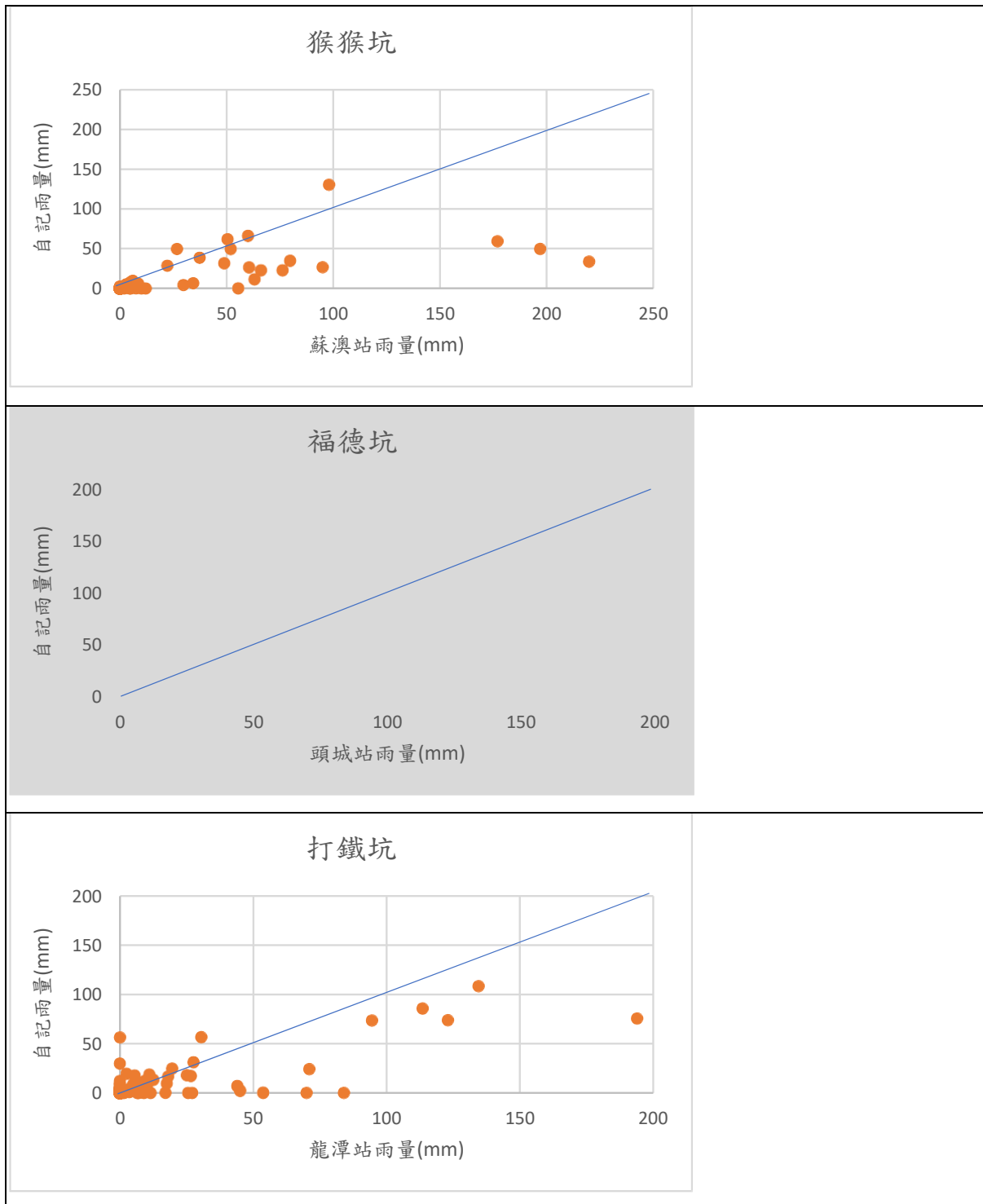


圖 3-30 三樣區自記雨量與官方雨量站雨量比較圖

二、估算野溪流量

(一) 臨界流量

為求得研究樣區之野溪流量，本研究於三個研究樣區內各找到一座高於溪床面之固床工。由於底床高度差異影響，使得固床工上游之亞臨界流經過固床工後形成超臨界流之跌水流態。由於臨界水位位於亞臨界流轉換成超臨界流之間，因此，架設水位計在研究樣區之固床工上頭所測得之水位資料可以視為臨界水位，而臨界水位可以藉由臨界流公式計算通過梯形斷面固床工之流量。圖 3-31 為梯形斷面渠道示意圖，由臨界水位推導之梯形斷面流量公式如下：

$$Q^2 = \frac{b^3}{b+2} \rightarrow Q = \sqrt{\frac{b^3}{b+2}} \quad (3-2)$$

式中， Q ：流量； C ：流量係數； g ：重力加速度； h ：水位；

b ：梯形斷面渠道底寬； z ：梯形斷面渠道邊壁豎橫比(1： z)

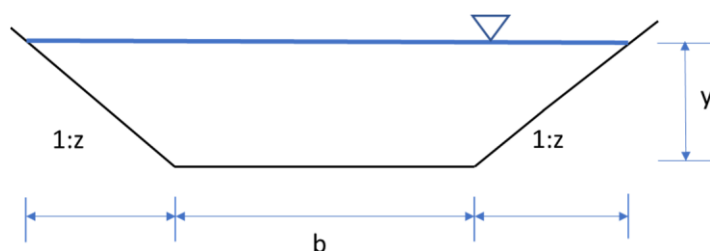


圖 3-31 梯形斷面渠道示意圖

(二) 牛頓法

以牛頓法，Newton-Raphson method 求解可以節省計算時間，尤其是求解洪峰流量條件下之水位高度。當流量公式如下式：

$$Q = VA = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A \quad (3-3)$$

則梯形斷面渠道之面積、濕周和水力半徑如下：

$$\begin{aligned} A &= (B + zy)y; \quad P = B + 2y\sqrt{1+z^2} \\ \rightarrow y &= \frac{A}{P} = \frac{(B+yz)y}{B+2y\sqrt{1+z^2}} \end{aligned} \quad (3-4)$$

將式(3-3)代入式(3-2)，可以得到：

$$f(y) = \frac{\sqrt{S} [(B+yz)y]^{5/3}}{n (B+2y\sqrt{1+z^2})^{2/3}} - Q \quad (3-5)$$

$$f'(y) = \frac{\sqrt{S} 5}{n 3} \frac{(B + 2zy)^{2/3}}{(B + 2y\sqrt{1+z^2})^{2/3}} - \frac{2}{3} \frac{[(B + zy)y]^{5/3}}{2\sqrt{1+z^2} (B + 2y\sqrt{1+z^2})^{2/3}} \quad (3-6)$$

$$\begin{aligned} f(y) &= 0 = f(y_0) + [f(y_n) - f(y_0)] \cdot \frac{f'(y_n)}{f'(y_0)} \\ \rightarrow y_{n+1} &= y_n - \frac{f(y_n)}{f'(y_n)} \end{aligned} \quad (3-7)$$

寫入程式並設定 $y_{n+1} - y_n \leq 0.001$ 或某一設定值。

當上述條件成立時， y_{n+1} 即為梯形斷面流量之水位。如果牛頓法無法求解時，趨近法也是可以迅速求解。

三、計算粗糙係數

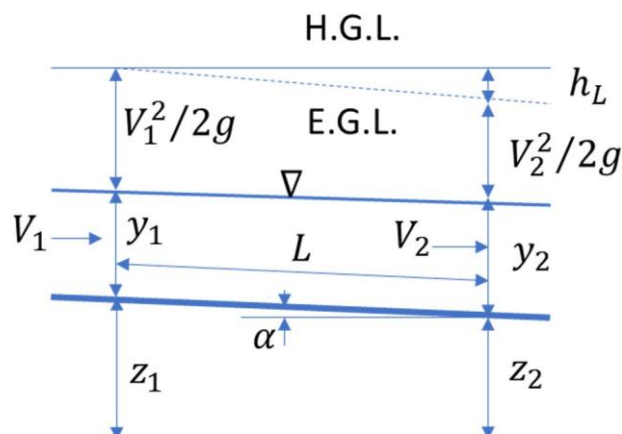


圖 3-32 明渠流況兩斷面之能量示意圖

考慮明渠流況兩斷面 1 和 2 間之能量損失，圖 3-32 中，

V_1 , y_1 , z_1 ：上游斷面之流速、水位和高程；

V_2 , y_2 , z_2 ：下游斷面之流速、水位和高程； h_L ：能

量損失； L ：斷面 1、2 間距離； α ：斷面 1、2 間底床傾斜角度 $H.G.L.$ ：

Hydraulic grade line，水力梯度線；

$E.G.L.$ ：Energy grade line，能量梯度線。能量變化與損失量可表示如下：

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g} \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned} H_1 &= z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \\ H_2 &= z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \\ H_1 - H_2 &= h_L \end{aligned} \quad (3-9)$$

式中， H ：總能量； f ：Darcy-Weisbach coefficient, 達西-韋斯巴哈係數； D ：圓管直徑； R ：水力半徑。

亦即在研究樣區河段量測到上、下游兩斷面之高程， z ，水位， y ，和流速， V 後，在能量守恆定律下，代入能量方程式就可得到能量損失， h_L 。能量損失代表明渠流任意兩斷面間之主要和次要損失之總和。由於黏滯損失、紊動損失等次要損失不容易在現場量測，均勻流流況下之數值也相對較小，可以忽略不計；另外，當上游野溪流況大部分為完全發展紊流流況時，河床面可視為平整河床，河床面粗糙度不考慮河床波(砂漣、砂丘、反砂丘)產生之砂波阻力；僅考慮表面粒徑所產生之粗糙度。因此，以護岸表面和河床質粗糙度等兩項參數作為本計畫在現場河段之總能量損失。

$$S_0 = \tan \theta \frac{z_1 - z_2}{L} \quad (3-10)$$

$$\rightarrow y_1 + \frac{v_1^2}{2g} + S_0 L = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (3-11)$$

$$\text{當 } S_f = \frac{h_L}{L}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow y_1 + \frac{v_1^2}{2g} &= y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + (S_f - S_0)L \\ S_f L &= (y_1 - y_2) \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + S_0 L \end{aligned} \quad (3-12)$$

本計畫於三個研究樣區內各選擇一段斷面固定、河床不沖不淤河道，於上、下游各架設一座水位計，利用水位資料計算求得該河段之粗糙係數。在能量守恆定律下，量測兩斷面之高程， z ，水位， y ，和流速， V ，代入能量方程式就可得到能量坡降， S_f 。

由(5-8)式得到能量坡降後，即可求得能量損失， h_L

$$\text{又 } S_f = \frac{h_L}{L} = \frac{V^2}{8gR} = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (3-13)$$

代入河段長度， L ，可得曼寧粗糙係數值

$$V = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (3-14)$$

式中， S_0 ：底床坡度； S_f ：能量坡度； n ：曼寧粗糙係數。

均質河床之曼寧粗糙係數 n 值，一般都採用周文德所著『Open Channel Hydraulics』所提供之『渠道與天然河道曼寧粗糙係數 n 值表』。也可以利用粗糙係數公式估算。一般常用之粗糙係數公式有三類，有蔡司公式(Chezy formula)、曼寧公式(Manning's formula)和達西-韋斯巴哈公式(Darcy-Welsbach equation)。其中，蔡司粗糙係數和曼寧粗糙係數是有因次；達西-韋斯巴哈粗糙係數是無因次。後來，曼寧粗糙係數也改為無因次。

第四章 粗糙係數分析

第一節 滲漏量分析

入滲為地表水經由土壤滲入地下，入滲水在土體內之向下運動稱滲漏，因此，入滲或滲漏都與地質特性有關。

一、研究樣區地質概述

依據經濟部地質調查及礦業管理中心之地質資料整合查詢系統和地質雲增值應用平台資料，查得猴猴坑溪、福德坑溪和打鐵坑溪等三個樣區之主要地質特性。

(一) 猴猴坑溪

猴猴坑為白米河東側支流。如圖 4-1 所示，集水區除了最上游處為南蘇澳層，其餘地區都屬於蘇澳層。其中，小帽山斷層為南蘇澳層與蘇澳層之交界線。南蘇澳層之地質年代較久，為始新世至漸新世年代之板岩、厚層變質砂岩與板岩互層之地質組成。蘇澳層則為年代較南蘇澳層輕之中新世板岩及硬頁岩，偶夾薄層變質砂岩之地質組成。白米河及其周邊區域則是第四紀礫石、砂、泥所組成之沖積層。穿過集水區中游處之紅線為複向斜褶皺；小帽山斷層下游處有一條向斜褶皺穿越。猴猴坑溪右岸有小規模之山崩與地滑地質敏感區零星散布，由於地質年代較久，除了最上游處之小帽山斷層外，沒有脆弱地質之構造線，且板岩、硬頁岩或變質砂岩質地耐風化、沖蝕，風化後之產物以礫石、砂和泥為主。猴猴坑集水區大部分為雜木林，偶有養殖池和零星住屋，開發程度低，歷年構築之護岸和系列固床工，發揮降低河床沖刷之效益，滲漏量小。



圖 4-1 猴猴坑溪地質圖

資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心/地質雲加值應用平台

(二) 福德坑溪

如圖 4-2 所示，福德坑集水區主要為地質年代較中新世老之漸新世雪山山脈之乾溝層，由硬頁岩夾薄至厚層砂岩，靠近吉祥橋附近河道及其周邊區域地質係同樣為漸新世之四稜砂岩，由厚層或塊狀白色中至極粗粒石英岩及硬頁岩組成。四稜砂岩為早期濱海三角洲或淺海相沉積環境下之產物，主要為中粒到粗粒之砂岩和和礫石一樣大之粗粒石英岩。乾溝層為四稜砂岩上方(年代較輕)變質泥質沉澱物，以板岩和硬頁岩為主，由於岩質緻密，經常形成陡壁。除了耐風化、沖蝕外，礫石粒徑較大。福德坑集水區共有 5 條斷層通過，自上游而下為外澳斷層、逆斷層和 3 條正斷層。外澳斷層北側之福德坑溪左岸有幾塊較大規模之山崩與地滑地質敏感區，該地區有防砂工程之興建，防止大量泥砂下移。尤其是 3 條正斷層密集出現在吉祥橋上游附近，該地區出現大礫石或巨石間隙夾雜較小粒徑砂石。集水區內自上游往下游有鶯仔嶺背斜和背斜，如圖中紅線所示。背斜下游有一條逆斷層和 3 條正斷層，滲漏量小。福德坑集水區大部分為雜木林，零星廟宇分散於集水區內。取水堰到吉祥橋間之河道有護岸和固床工調整河道坡度，該河段右岸也整理成大片休閒綠地。



圖 4-2 福德坑溪地質圖

資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心/地質雲加值應用平台

(三) 打鐵坑溪

打鐵坑集水區地質較為多樣，如圖 4-3 所示，北側上游往下游分別為店子湖層、中壠層、桃園層、卓蘭層和台地堆積層。南側上游往下游分別為南港層、石底層、南莊層、桃園層、卓蘭層和台地堆積層。打鐵坑河道及其周邊區域為沖積層。

其中，店子湖層為更新世年代之紅土，礫石，砂和砂及粉砂之透鏡體組成；中壠層同樣為更新世之紅土，礫石，砂及粘土組成；桃園層地質年代也是更新世，由紅土，礫岩、砂及粘土組成；卓蘭層地質年代為上新世，地質組成為砂岩，泥岩，頁岩互層；台地堆積層為全新世，由礫石，砂及粘土組成。

南港層牛肩頭段地質年代為中新世，由塊狀砂岩夾頁岩組成；石底層亦屬中新世年代，地質組成為塊狀砂岩，白砂岩，砂岩及頁岩互層，含煤層；南莊層為中新世，地質組成為砂岩及頁岩互層，含煤層；河道沖積層為

全新世之礫石，砂及粘土組成。

集水區內依據地質年代可以分上新世之卓蘭層，中新世之石底層、南港層、南莊層。更新世之店子湖層、中壠層和桃園層(塗明寬，1990)在何春蓀(1986)之分類，都屬於紅土台地堆積層。

卓蘭層由於砂岩和頁岩之抗蝕力相差極大，單面山或豬背嶺之地形景觀為卓蘭層之一個重要特徵。本層之砂岩較鬆軟，有泥質砂岩和粗粒之碎岩屑。瑞芳群之岩石代表中新世之一個沉積循環，包括一個含煤地層(石底層)和一個海相地層(南港層)。石底層是含煤之海陸混合相沉積，石底層上方之南港層有顯著之厚層塊狀砂岩，經常形成陡壁懸崖。

三峽群是台灣西部中新世最年輕之一個沉積循環，三峽群和瑞芳群一樣，包含下方之含煤地層(南莊層)和上方之海相地層(桂竹林層)，南莊層大部分由厚層砂岩組成。桃園南莊層之中下不含有許多凝灰岩、凝灰碎屑岩和少量之玄武岩熔岩。打鐵坑集水區內3個更新世地層之岩性大致相同，主要是由下部之礫石與上部之紅土組成，另外含少量黑色玄武岩，礫石直徑則通常在10至30釐米之間(塗明寬1990)。

集水區上游地區有兩道斷層，最上游之是石門斷層(逆斷層)，在其下游之是大平地斷層(掩覆斷層)。打鐵坑溪為大漢溪支流，位於石門水庫庫區和後池堰西側，集水區大部分為雜木林，右岸植生覆蓋良好，左岸較多聚落、水池和零星廟宇。河道上有護岸和固床工調整河道坡度，由於地質年代較輕，岩性結構沒有老地質年代之緻密，抗蝕力較差，壓密度低，土壤孔隙率大，滲漏量也較大。

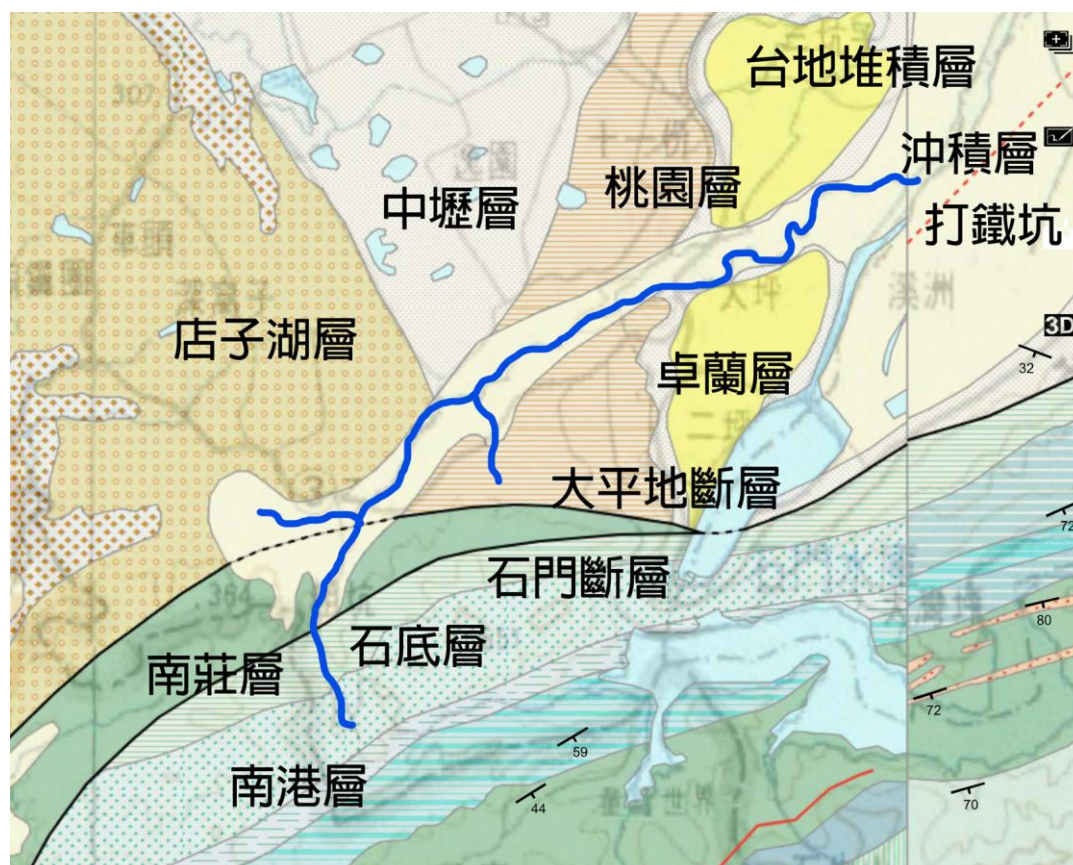


圖 4-3 打鐵坑溪地質圖

資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心/地質雲加值應用平台

二、無降雨期間之平均水位

5 年間 3 個研究樣區都有超過各該樣區 2 年重現期距、24 小時延時降雨量之降雨事件，如果從連續一段時間無降雨期間之平均水位可以視為基流量，如表 4-1 所示。打鐵坑溪出現沒有降雨卻有水位歷線發生現象，目前尚無法找出滲漏量，未來需要更多資料加以分析。將 5 年來研究樣區較長無降雨期間之水位紀錄，並繪製如圖 4-4 所示。自表 4-1、圖 4-4 中可

知：除了福德坑水位穩定維持在 2.42-5.9 釐米。猴猴坑無降雨期間平均水位最高，介於 7.48-29.9 釐米之間。打鐵坑則是 3.95-12.47 釐米之間。如果以 10 分鐘為單位，可以大略從猴猴坑溪和福德坑溪分別求得滲漏量 1.17mm 與 1.16mm。

表 4-1 無降雨事件期間之水位紀錄

樣區	無降雨期間		無降雨天數(day)	平均水位(cm)
猴猴坑	2021	11/30-12/03	4	29.9
	2022	07/07-07/28	22	17.97
	2023	02/27-03/11	13	22.65
	2024	05/03-05/18	16	18.42
	2025	08/21-08/27	7	7.48
福德坑	2021	11/05-11/11	7	5.05
	2022	08/03-08/28	26	5.01
	2023	01/26-02/03	9	2.42
	2024	02/10-02/29	20	5.9
	2025	09/10-09/19	20	3.67
打鐵坑	2021	09/22-10/09	18	12.47
	2022	07/08-07/18	11	9.66
	2023	02/26-03/11	14	5.62
	2024	02/10-02/24	15	7.54
	2025	06/30-07/04	5	3.95

猴猴坑與福德坑最長無降雨天數都發生在 2022 年，分別為 22 天與 26 天；打鐵坑則發生在 2021 年，為 18 天。理論上，福德坑集水面積最大，枯水期流量與水位應該是三樣區中最大，因為集水區斷層較多，反而是水位最小。猴猴坑因為地質年代係三樣區中最古老，岩質堅硬，導致枯水期水位最高。

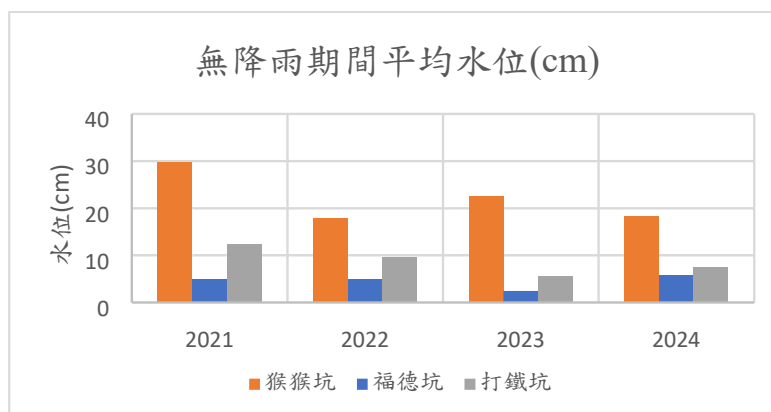


圖 4-4 無降雨期間平均水位

各個歷線之起訖時間和尖峰發生時間如表 4-2 所示。經過比較表 4-1 和表 4-2 後發現，猴猴坑歷線之起始和結束水位大於無降雨事件期間之水位；福德坑同樣大於無降雨事件期間之水位，而且無降雨期間平均水位最低；打鐵坑之起始和結束水位最小，接近無降雨期間平均水位。由於資料較少，有待未來蒐集更長期之水位資料後才能有更具體之分析。經計算結果與圖 4-5 顯示，猴猴坑與福德坑之滲漏量分別是 1.17 與 1.16 毫米。打鐵坑因為有伏流水現象，尚無法估算滲漏量。

選取三研究樣區較接近單峰歷線點繪如圖 4-6 所示，自圖中可知，猴猴坑之歷線較接近正常曲線；福德坑與打鐵坑都偏右。

表 4-2 研究樣區水位歷線之相關參數

研究樣區	歷線起始時間	水位(cm)	歷線結束時間	水位(cm)	尖峰發生時間	水位(cm)
猴猴坑	2025/09/29 05:00	6.3	2025/09/29 22:50	6.3	2025/09/29 12:00	9.5
福德坑	2025/07/09 04:00	0	2025/07/09 06:50	0	2025/07/09 05:40	8.27
打鐵坑	2025/06/21 10:30	0	2025/06/21 12:10	0	2025/06/21 11:20	13.19

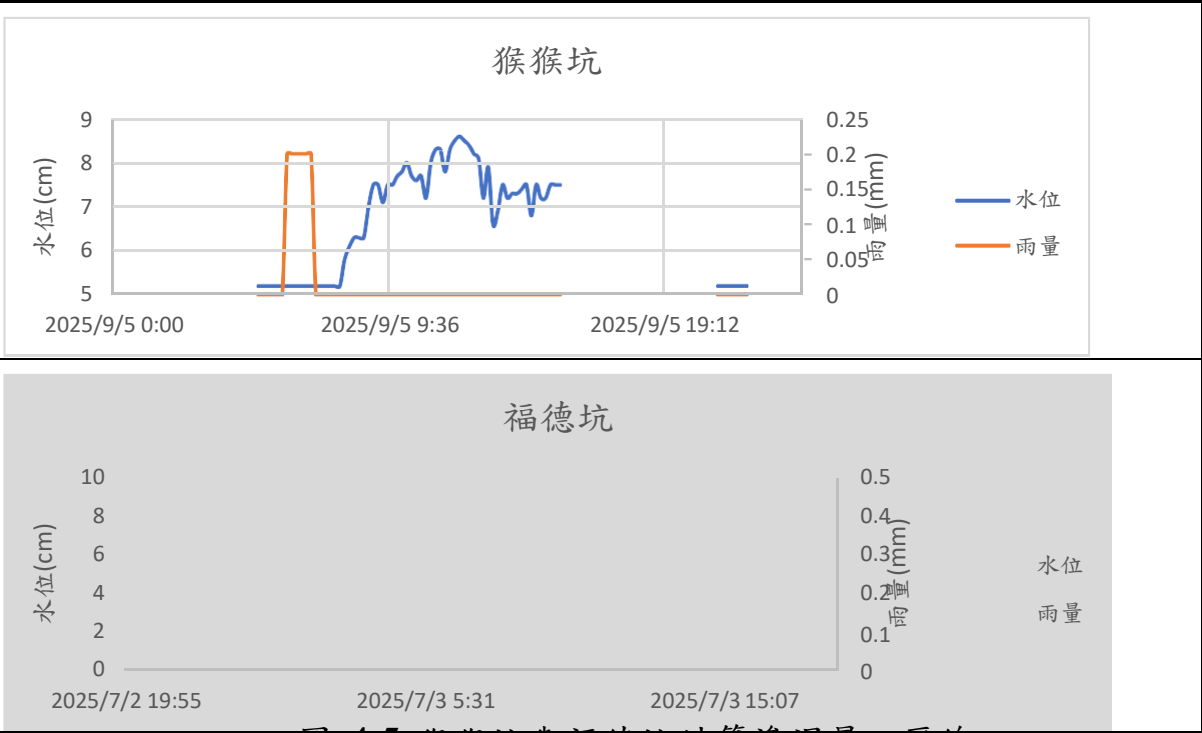


圖 4-5 猴猴坑與福德坑計算滲漏量之歷線

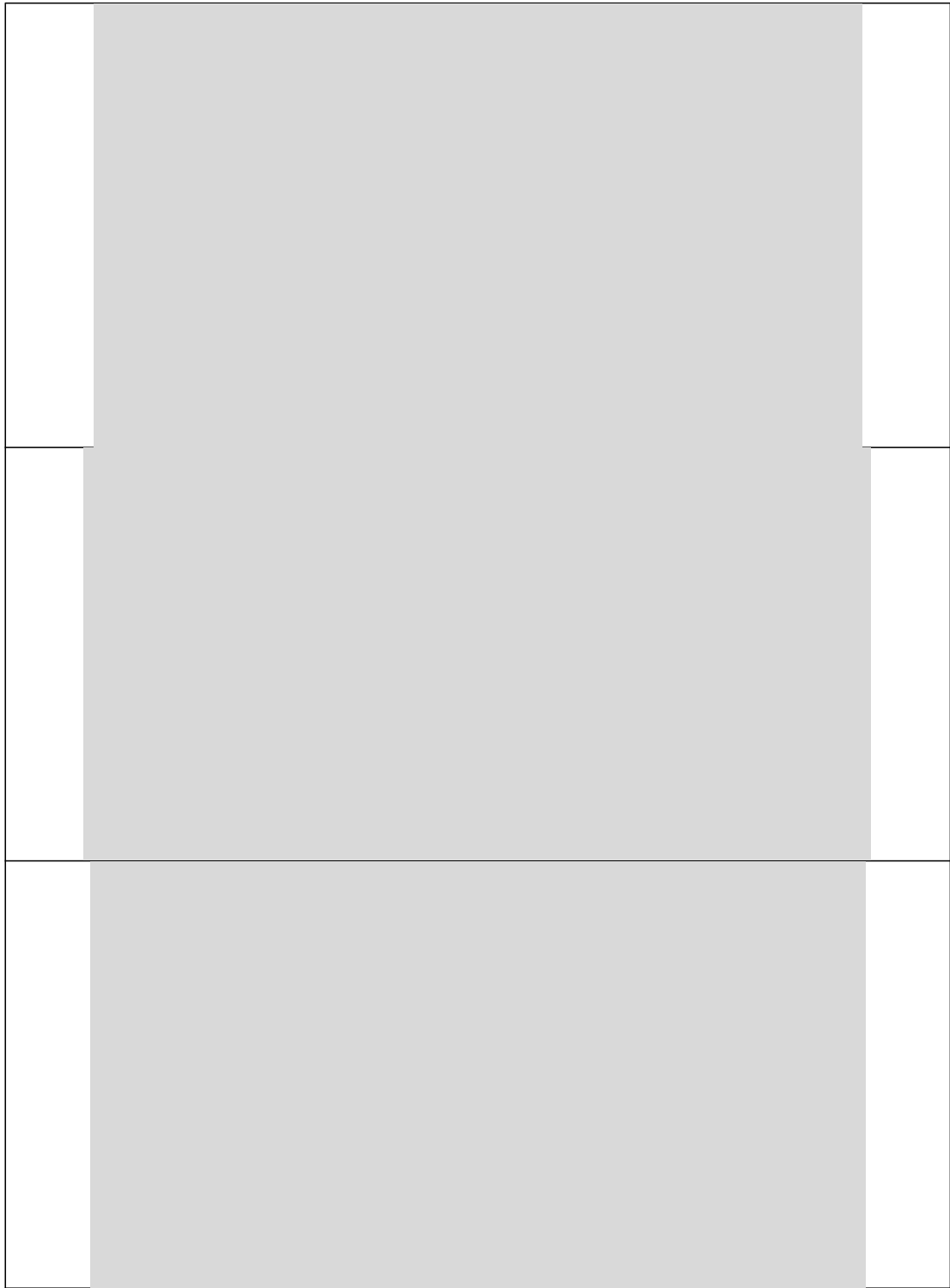


圖 4-6 研究樣區單峰水位歷線

第二節 野溪流量分析

經過現地實際量測流速和水位，猴猴坑臨界流量之流量係數為 0.44；福德坑為 0.57；打鐵坑則為 0.54。亦即

$$\begin{aligned} \text{猴猴坑：} Q &= 8.98h^{1.5} + 0.48h^{2.5} \\ \text{福德坑：} Q &= 26.82h^{1.5} + 0.73h^{2.5} \\ \text{打鐵坑：} Q &= 38.06h^{1.5} + 1.00h^{2.5} \end{aligned}$$

由於臨界水位計與觀測之上下游水位計間有一段距離，以實測流速和水位修正流量後，得到流量面積關係式如下。

$$Q \text{ cm}^3 = 1.63Q_{\text{u}} = 1.46 \frac{A_{\text{u}}}{A_{\text{c}}} Q_{\text{m}} = 1.46 \frac{298.19}{266.93} Q_{\text{m}}^{(4-1)}$$

其中， Q_{u} 、 A_{u} ：猴猴坑上游水位站流量、集水面積；

Q_{m} 、 A_{c} ：猴猴坑臨界水位站流量、集水面積。三個研究樣區流量觀測點位置與集水區相關參數如表 4-3 所示。其中，逕流係數依據水保手冊選定。一日、二日降雨延時之重現期 2 年和 50 年洪峰流量如表 4-4 所示，其洪峰流量與水深之關係如圖 4-7 所示。

表 4-3 集水區流量站參數

集水區	集水面積(km ²)	逕流係數	設計流量(cms)
猴猴坑溪上游固床工	2.6693	0.65	67.66
福德坑溪攔水堰	8.6188	0.75	237.12
打鐵坑溪渡槽上游固床工	5.8141	0.7	137.46

表 4-4 集水區洪峰流量

集水區別	一日降雨延時重現期洪峰流量		二日降雨延時重現期洪峰流量	
	重現期 2 年洪峰流量(cms)	重現期 50 年洪峰流量(cms)	重現期 2 年洪峰流量(cms)	重現期 50 年洪峰流量(cms)
猴猴坑	8.59	14.17	5.97	9.85
福德坑	23.92	39.87	15.88	26.47
打鐵坑	14.06	23.48	9.23	15.41

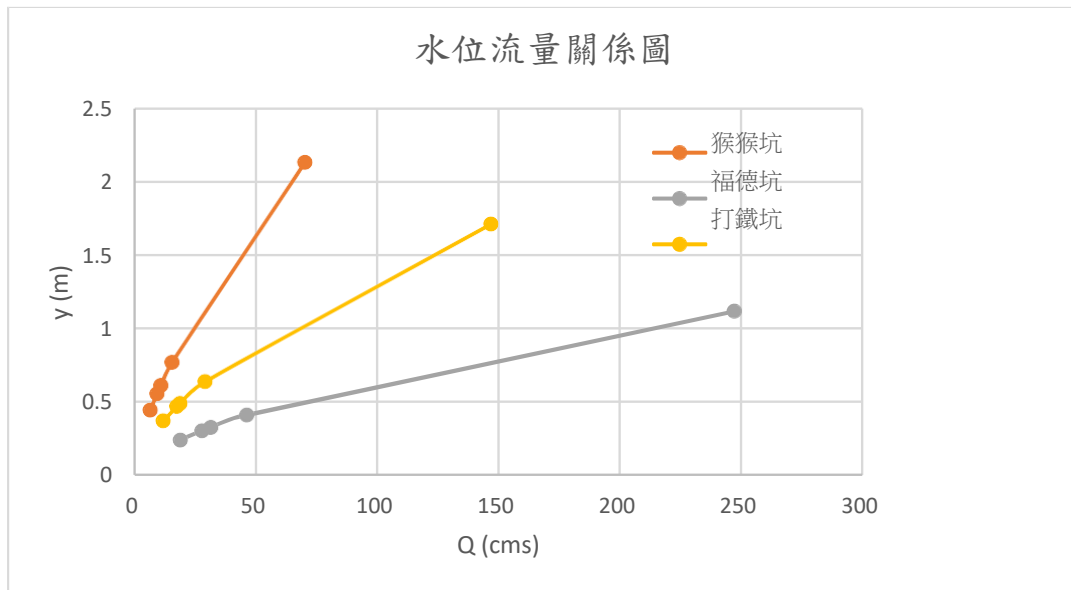


圖 4-7 研究樣區洪峰流量與水深關係圖

第三節 複合式粗糙係數分析

一、複合式粗糙係數模式

當河床粗糙係數和兩側護岸粗糙係數差異較大時，就必須考慮複合式粗糙係數。因此，綜整底床質和護岸材質不同粗糙係數成為複合式粗糙係數 (Composite roughness)。

Herschel (1897) 提出 Antoine Chézy 為第一位在其未發表論文裡探討定床渠道阻力之學者，推論渠道阻力 C 與濕周 Ω 、流速平方值 V^2 成正比；橫斷面面積 A 、水力坡降 S 成反比。

$$C = \frac{V^2 P}{A \Omega} \text{ or } V = \frac{C \sqrt{R \Omega}}{P} \quad (4-2)$$

曼寧 (Manning) 藉由試驗得到公制之 Chézy 係數與水力半徑 R 之 $1/6$ 次方成正比，推導出曼寧粗糙係數 n 。1957 年，Rouse and Ince 也得到同樣結論。

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (4-3)$$

曼寧將其代入上式得到下列方程式：

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (4-4)$$

Manning's (1889) 認為具有粗糙係數之簡易渠道水流方程式之函數僅有底床粗糙高度。Chow (1959) 認為在小福祿數 ($Fr < 3$) 之流況下，流體重力之效應對於阻力是可以忽略不計。他同時也認為平滑表面之 f 曲線群和

Prandtl-von Karman 之平滑管壁邊界流是一致之趨勢。

Chow (1959), Streeter & Wylie (1979), Simons et al. (1982), Yen (1992) 認為曼寧 n 之影響因子包含渠道橫斷面之尺寸和形狀。

$$\frac{V}{n} = \frac{V^8}{f n^3 g} = \frac{R^{1/6}}{n^3 g} = \frac{C}{n^3 g} \quad (4-5)$$

$$n = \frac{1}{C} \sqrt{R} \quad (4-6)$$

由於定量流和漸變流有很好的相關性，當不存在定量流時，經常以平均水深代替正常水深計算水力半徑、雷諾數和速度等參數。而且，高糙率之物質會有較為發散之 n 值。另外，福祿數會隨雷諾數增加而減少。相同雷諾數之 f 值會隨糙度增加而增加； n 值會隨坡度增加而增加。同樣坡度之 n 對 R/k 曲線群間距會較 n 對 Re 小。

雖然木塊和梯形波紋片之高度相同，但是兩者之 n 對 R/k 趨勢卻不相同，木塊之低水位阻力大於梯形波紋片。

1956 年 Cowan 提出水力半徑小於 15 呎(4.57 米)之溪流河床橫斷面之幾何形狀並非是影響粗糙係數之唯一因子，相關因子如

表 4-5 所示。美國水土保持局 (United States Soil Conservation Service, SCS) 接著於 1963 年發表整體曼寧係數 (overall Manning's coefficient) 方程式：

$$n_e = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (4-7)$$

式中， n_b 為天然順直不變渠道之曼寧粗糙係數； n_1 為渠道表面不規則性之校正因子； n_2 為渠道橫斷面之形狀和尺寸變化之校正值； n_3 為阻礙物之校正值； n_4 為洪水平原上之植生和水流狀況之校正值； m 為渠道蜿蜒度之校正值。

表 4-5 Cowan 模式之各項參數值

Channel conditions		Values	
Material involved	Earth	n_0	0.020
	Rock cut		0.025
	Fine gravel		0.024
	Coarse gravel		0.028
Degree of irregularity	Smooth	n_1	0.000
	Minor		0.005
	Moderate		0.010
	Severe		0.020
Variations of channel cross section	Gradual	n_2	0.000
	Alternating occasionally		0.005
	Alternating frequently		0.010-0.015
Relative effect of obstructions	Negligible	n_3	0.000
	Minor		0.010-0.015
	Appreciable		0.020-0.030
	Severe		0.040-0.060
Vegetation	Low	n_4	0.005-0.010
	Miedium		0.010-0.025
	High		0.025-0.050
	Very high		0.050-0.100
Degree of meandering	Minor	m_5	1.000
	Appreciable		1.150
	Severe		1.300

資料來源：Chow, V.T., Open-channel Hydraulics, 1980

Rouse (1965) 也指出曼寧粗糙係數 (Manning's n) 之影響因子有流體性質、流動特性、河段橫斷面幾何形狀和地形因子，以及含砂量。由於河床之粗糙係數不足以代表河段總阻力，因此 Chow (1956)、Barnes (1967) 和 Acrement and Schneide (1989) 陸續提出現場可以應用之數值。實務上，當部份經驗值明顯不是合理之估計值，或是未列於粗糙係數表內時，Soong and Depue (1996)認為試誤法 (trial-and-error approach)，以及 Barnes (1967)認為經驗值都是可以接受之。

當渠道橫斷面之粗糙度並非均勻分布，渠床表面粗糙度已經不足以代表總阻力時，曼寧有效係數值(effective value of Manning's n n_e)可表示如下：

$$n_e = r \frac{\sum_{i=1}^N (k_i n_i^a)^{1/\alpha}}{k} \quad (4-8)$$

其中， n 為各分區之粗糙係數， i 代表各個分區， N 為分區總數量， k 為各分區權重，一般為各分區濕周。 a 為各分區之流況性質，Horton (1933) 假設 $a = 1.5$, Pavlovskii (1931), 以及 Einstein and Banks (1950) 假設 $a = 2$ 。James and Jordanova (2010) 指出大部分模式並沒有考慮各分區間之橫向動量相互交換作用，此一作用對於漫灘水流之影響非常明顯；對於大部分河槽內小流量之影響很小。

針對渠道橫斷面植生和不規則型態對粗糙係數之影響，Wallingford (2004) 使用 Conveyance Estimation system (CES)，也經過 James and Jordanova (2010) 證實，推導下列方程式：

$$n_i = (n_{uy}^2 + n_{veg}^2 + n_{iyy}^2)^{1/2} \quad (4-9)$$

式中， n_{uy} 為表面粗糙係數； n_{veg} 為植生粗糙係數； n_{iyy} 為不規則型態粗糙係數

儘管不同因子之粗糙係數間存在相互作用，Einstein and Barbarossa (1952) 認為單一因子之曼寧與達西-韋斯巴哈粗糙係數之關係可以下式表達：

$$n = \left(\frac{f \Omega^{1/3}}{8g} \right)^{1/2} \quad (4-10)$$

Morris and Wigget (1972) 認為渠道粗糙係數為底床、堤岸和表面粗糙係

數之組合，而且在低水位水流狀態下，堤岸粗糙係數為次要參數。其中，表面粗糙係數包含河床質和河床型態拖曳力，係流體動力和阻力平衡下之底床剪應力：

$$\tau_{\text{total}} = \tau_{\text{grain}} + \tau_{\text{form}} \quad (4-11)$$

有關沿著堤岸之植生粗糙係數研究有：James and Mooka (2006) 在 12.3m 長，1.0m 寬，坡度 0.001 之渠道內布置方框，佔有渠道面積 50% 之縱向方框有 7 種不同寬度和位置，而且每個 1.0m x 0.125m 之方框內以縱橫向間隔 25mm 布置 5mm 直徑莖桿。每一種樣式都做 4 到 5 種流量試驗。寬深比大於 2 之試驗結果顯示：相較於沒有莖桿之 0.0102，莖桿配置之 n 值為 0.0432。

Hirschowitz and James (2009) 使用 Darcy-Weisbach 摩擦係數建立水域植生摩擦模式，並推薦 Kaiser's (1984) 公式

$$\tau = \tau_t + 0.18 \log \left(0.0135 \frac{V_{hi}^2}{n^2 V_{veg}^2} \right) \quad (4-12)$$

式中， V_{hi} 為未受植生影響之平均速度； V_{veg} 為植生區域內之平均速度； h_t 為水深。除了定義 $0.06 < \tau/D < 0.1$ 為狹窄渠道外，而且

$$\tau_0 = 0 \text{ for } W/D > 5 \quad (4-13)$$

Ikegwuoha (2014) 以單一水槽、不規則、阻礙物、植生、不規則植生、不規則阻礙物、植生與阻礙物，以及綜合不規則、植生、阻礙物三類型之平滑和粗糙水槽試驗，探討總粗糙係數是否能夠以幾何相加加總各項單元之粗糙係數，得到：渠道總阻力係數並非各項粗糙係數之幾何相加，底床阻力

總是較大。粗顆粒河床之粗糙係數隨水深增加而遞減；河床型態拖曳力影響程度較大之粗糙係數則隨水深增加而增加，以及 SCS 模式於兩種阻力單元組合下有較小誤差之成果；粗糙底床之數據點則會較為發散。

Ikegwuoha (2014) 使用 James (2012), Meile et al. (2011)，以及 Hirschowitz and mes (2009) 探討阻礙物、植生和堤岸不規則性對阻力係數之影響。

Yen (2002) 依據各分區和全斷面之流量、流速、阻力或剪應力之不同假設條件，發表 17 個尚未驗證之單一或複式斷面複合式曼寧 n 之相關模式以預測渠道之水流阻力，如圖 4-8、圖 4-9 所示。

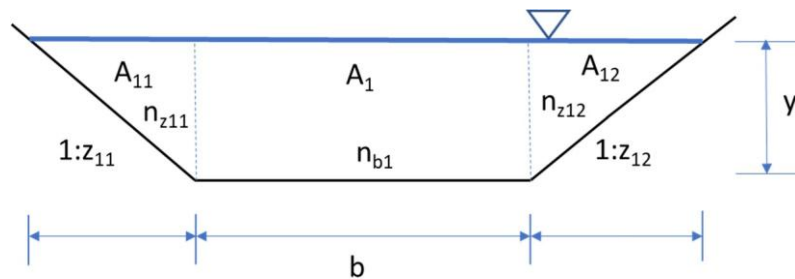


圖 4-8 單一斷面示意圖

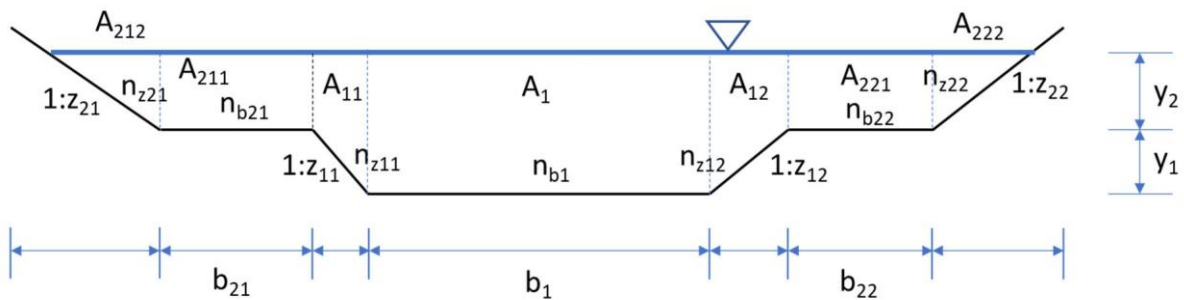


圖 4-9 複式斷面示意圖

依據假設條件，這 17 個模式可以分成 4 大類：

(一) 流速：渠道橫斷面各分區之平均流速與全斷面平均流速相等，

$$V_i = V \quad (4-14)$$

1. Horton (1933), Einstein (1934)

$$v_i = v, S_i = S, \frac{v_i}{v} = \frac{S_i}{S} = \frac{A_i}{A} \quad (4-15)$$

$$\frac{v_i}{v} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i^3}{v^3} n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i^3}{v^3} n_i}{P} \quad (4-16)$$

2. Colebatch (1941)

類似 Horton & Einstein 模式，Yen(2002)認為是錯誤推導；Tullis(2012)提出校正係數：

$$\frac{v_i}{v} = \frac{R_{wall}}{R_{bae}} \quad (4-17)$$

$$\frac{v_i}{v} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i^3}{v^3} A_i n_i}{\sum_{i=1}^N A_i n_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i^3}{v^3} A_i n_i}{A} \quad (4-18)$$

(二) 阻力：渠道橫斷面各分區之阻力和等於全斷面總阻力。

1. Pavlovskii (1931)

$$P \gamma R^2 = \sum_{i=1}^N \gamma_i S_i, \frac{P \gamma_i S_i}{P \gamma R^2} = (R_i/R)^{1/6} \text{ or } \gamma_i = \gamma \text{ \& } R_i = R \quad (4-19)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = r^2 \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}{n_i} \quad (4-20)$$

2. F2

$$P\gamma R = \sigma_i \gamma \sigma_i S_i, \sigma_i / \sigma = (R_i / R)^{2/3} \quad (4-21)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = r^2 \frac{\sum_{i=1}^N A_i n_i}{A} \quad (4-22)$$

3. F3

$$P\gamma R = \sigma_i \gamma \sigma_i S_i, \sigma_i = \sigma \quad (4-23)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{R^{1/3}}{P} \frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 P_i}{R_i^{1/3}} \quad (4-24)$$

4. F4

$$P\gamma R = \sigma_i \gamma \sigma_i S_i, \sigma_i / \sigma = (R_i / R)^{1/2} \quad (4-25)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 R_i^{2/3}}{P^{2/3}} \quad (4-26)$$

(三) 流量：渠道橫斷面各分區之流量和等於全斷面流量。

1. Lotter (1993)

$$\begin{aligned} Q_i, S_i &= \frac{Q_i}{P} \\ &= A/P \end{aligned} \quad (4-27)$$

$$Q_i = \frac{p_i^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \frac{p_i R_i^{5/3}}{n_i}} \quad (4-28)$$

2. Ida (1960), Engelund (1964)

$$Q_i, S_i = \frac{Q_i}{R_i^{5/3}}, \quad \frac{P^{5/3}}{\sum R_i^{5/3}} = \frac{A^{2/3}}{\sum A R_i^{2/3}} = 1 \quad (4-29)$$

$$Q_i = \frac{\sum_{i=1}^N R_i^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \frac{p_i R_i^{5/3}}{n_i}} \quad (4-30)$$

3. Q1

$$Q_i, S_i/S = (R/R_i)^{4/3} \quad (4-31)$$

$$Q_i = \frac{A}{\sum_{i=1}^N A_i/n_i} \quad (4-32)$$

4. Felkel (1960)

$$Q_i, S_i/S = \frac{Q_i}{(R/R_i)^{10/3}} \quad (4-33)$$

$$\bar{z} = \frac{P}{\sum_{i=1}^N z_i/n_i}$$

(4-34)

5. Q2

$$Q_i = Q_i, S_i / S = R_i$$

(4-35)

$$Q_i = \frac{p_i^{7/6}}{\sum_{i=1}^N \frac{p_i R_i}{n_i}}$$

(4-36)

(四) 剪力速度：渠道橫斷面各分區之剪力速度和等於全斷面剪力速度。

1. U.S, Army Corps of Engineers Los Angeles District Method, Cox (1973)

$$Q_i / Q = (R_i / R)^{7/6}$$

(4-37)

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{p_i^{7/6}}{(\sum_{i=1}^N p_i^{7/6} S_i)}$$

(4-38)

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i A_i}{A}$$

(4-39)

2. Yen 1 (1991)

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{p_i^{7/6}}{(\sum_{i=1}^N p_i^{7/6} S_i)}, \frac{Q_i}{Q} = (R_i / R)^{1/6} n_i^{7/6} = n_i^{7/6} \frac{Q_i}{Q}$$

(4-40)

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i^{7/6} Q_i}{P}$$

(4-41)

3. Yen 2 (1991)

$$\overline{.jgR} = \overline{\left(\overline{.jg}^{[i]} S_i \right)}, [i] = [i]$$

(4-42)

$$[i] [i] = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{n_i [i]}{R_i^{1/6}}}{P/R^{1/6}}$$

(4-43)

4.
U*1

$$\overline{.jgR} = \overline{\left(\overline{.jg}^{[i]} S_i \right)}, [i]/[i] [i] = (R_i/R)^{2/3}$$

(4-44)

$$[i] [i] = \frac{\sum_{i=1}^N n_i [i] R_i^{1/2}}{P [i]^{1/2}}$$

(4-45)

5. Yen 3 (1991)

$$\overline{.jgR} = \overline{\left(\overline{.jg}^{[i]} S_i \right)}, [i]/[i] [i] = (R_i/R)^{1/2}$$

(4-46)

$$[i] [i] = \frac{\sum_{i=1}^N n_i [i] R_i^{1/3}}{P [i]^{1/3}}$$

(4-47)

(五) 對數速度分布：Krishnamurthy & Christensen (1972)

$$[i] [i] = Q_i, S_i = [i]$$

(4-48)

$$\frac{Q_i}{2.5.jg} = h^{3/2} P_i \text{Lln} \left(\frac{10.93 h_i}{k_i} \right) ,$$

$$\frac{Q_i}{2.5.jg} = h^{3/2} P_i \text{Lln} \left(\frac{10.93 h_i}{k_i} \right) ,$$
(4-49)

$$\alpha = 0.0342k$$
(4-50)

$$\alpha = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i h_i^{1.5} \ln n_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i h_i^{1.5}} \right)$$
(4-51)

複合式粗糙係數模式彙整如表 4-6 所示。表 4-7 為對數速度分布假設條件之複合式粗糙係數模式。

表 4-6 複合式粗糙係數模式彙整表

模式	假設條件	作者	年份
流速	各分區平均流速等於全斷面平均流速		
$\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i n_i^{2/3}}{P}$	$V = \alpha, S = \alpha, A = A_i$	Horton, Einstein	1933, 1934
$\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i n_i^{2/3}}{A}$	$\alpha = R_w / R_b$	Colebatch (錯誤推導)	1941
阻力	總阻力等於各分區阻力和		
$\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i n_i^{1/2}}{P}$	$P \gamma R = P \gamma S_i$ $\alpha_i / \alpha = (R_i / R)^{1/6}$ or $\alpha_i = \alpha$ & $R_i = R$	Pavlovskii	1931
$\frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i n_i^{1/2}}{A}$	$P \gamma R = P \gamma S_i$ $\alpha_i / \alpha = (R_i / R)^{2/3}$		
$\frac{R^{1/3} \sum_{i=1}^N \alpha_i n_i^{1/2}}{R^{1/3}}$	$P \gamma R = P \gamma S_i$ $\alpha_i = \alpha$		

$\frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 R_i^{2/3}}{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{2/3}}^{1/2}$	$P\gamma R = P\gamma_i S_i$ $R_i/R = (R_i/R)^{1/2}$		
流量	總流量等於各分區流量和		
$\frac{p_i^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \frac{p_i^{5/3}}{n_i}}$	$Q_i, S_i =$ A/P	Lotter	1933
$\frac{\sum_{i=1}^N R_i^{5/3}}{p R^{5/3}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_i^{5/3}}{n_i}}{R^{5/3}}$	$Q_i, S_i =$ R_{fro} $\frac{p_i^{5/3}}{\sum_{i=1}^N p_i^{5/3}} = \frac{A R_i^{2/3}}{\sum_{i=1}^N A R_i^{2/3}} = 1$	Ida, Engelund	1960, 1964
$\frac{A}{\sum_{i=1}^N A_i/n_i}$	$Q_i,$ $S_i/S = (R/R_i)^{4/3}$		
$\frac{P}{\sum_{i=1}^N P_i/n_i}$	$Q_i,$ $S_i/S = (R/R_i)^{10/3}$	Felkel	1960
$\frac{p_i^{7/6}}{\sum_{i=1}^N \frac{p_i^{7/6}}{n_i}}$	$Q_i, S_i/S = R/R_i$		1973
剪力速度	總剪力速度等於各分區剪力速度和		
$\frac{\sum_{i=1}^N n_i A_i}{A}$	$R_i/R = (R_i/R)^{7/6}$ $\frac{R_i}{R}$	U.S, Army Corps of Engineers Los Angeles District Method, Cox	1973
$\frac{\sum_{i=1}^N n_i R_i}{P}$	$\frac{R_i}{R} = (R_i/R)^{1/6}$ $n_i R_i$	Yen 1	1991
$\frac{\sum_{i=1}^N \frac{n_i R_i}{R_i^{1/6}}}{P/R^{1/6}}$	$\frac{R_i}{R} =$	Yen 2	1991
$\frac{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{1/2}}$	$\frac{R_i}{R} =$ $\frac{R_i}{R} = (R_i/R)^{2/3}$		
$\frac{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{1/3}}{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{1/3}}$	$\frac{R_i}{R} =$	Yen 3	2002

資料來源：Yen, B.C., Open Channel Flow Resistance, J. Hydraulic Eng, ASCE., 2002

表 4-7 對數速度分布假設條件之複合式粗糙係數模式

模式	作者	年份
對數速度分布	寬廣渠道全水深之對數速度分布	
$n_i = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^N n_i h_i^{1.5} \ln n_i}{\sum_{i=1}^N n_i h_i^{1.5}}\right)$	Krishnamurthy & Christensen	1972
假設條件	$Q_i, S_i = \tau$ $\frac{Q_i}{h^{3/2}} = PL \ln\left(\frac{10.93 h_i}{\tau}\right),$ $\frac{Q_i}{h^{3/2}} = PL \ln\left(\frac{10.93 h_i}{\tau}\right),$ $\tau = 0.0342k$	

資料來源：Yen, B.C., Open Channel Flow Resistance, J. Hydraulic Eng, ASCE., 2002

二、分區濕周對複合式粗糙係數影響

Yen et al. (1985) 指出，一般複式斷面是不考慮渠道橫斷面各分區界線之劃分方式，除了穩定定量流外，尤其是複式斷面和彎道之二次流 (secondary flow) 所造成各分區之動量和能量坡降都不同，導致不同劃分方式之分區面積和水力半徑都不同，計算所得之 n 值也不同。這 17 種模式中，部分模式只要輸入各分區之濕周即可；部分模式除了濕周外還需要水力半徑。由於水力半徑之計算需要各分區面積，不同分區之劃分方式將會出現不同之水力半徑。劃設渠道橫斷面之分區方法有下列 6 種 (Yen, 2002)

- (一) 自斷面邊界之每個斷點延伸垂直線到水面，作為分區界線。
- (二) 自斷面每個邊角或斷點劃設等分線。
- (三) 自複式斷面之兩個斷點劃設水平之滿水位線，分割主河槽區域和洪水平原區域。
- (四) 劃分主河槽和洪水平原分區後，在兩分區內各自延伸垂直線或劃設等分線。
- (五) 沿著零剪力面 (zero-shear surface) 劃設之直線或曲線對角線。
(Yen and Overton, 1973; Yen and Ho, 1983)
- (六) 當數條等分線交會在水面下時，往上垂直延伸交會點到水面，作為各分區之界線。

鑒於表 4-6 之各個模式係基於渠道之幾何形狀和濕周上之水力糙度所推導而得，對於粗糙係數和雷諾數、粗糙高度等參數之關係尚不可知。雖然 Manning (1889) 認為 n 為常數是充分正確 (sufficiently accurate)，Chow (1959) 則提出 n 在大多數河流中並非常數；而且會隨水位升高而降低。另外，也有均勻內面工渠道內之 n 會隨水位、流量和坡度改變 (Limerinos, 1970;

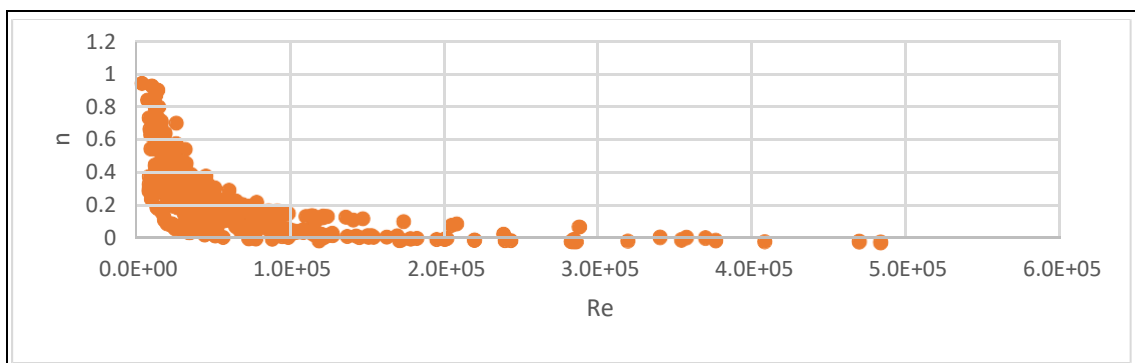
Bray, 1979; Bathurst et al. 1981)。Yen (2002) 認為 n 值幾乎和流況無關，可以被視為常數。河溪治理係採取設計流量和固定 n 值以計算設計水位，這時可將 n 值視為與流況無關。而工程師設計時所使用之 n 值為完全紊流狀態下之 n 值，亦即不隨雷諾數變化之 n 值。

三、複合式粗糙係數分析

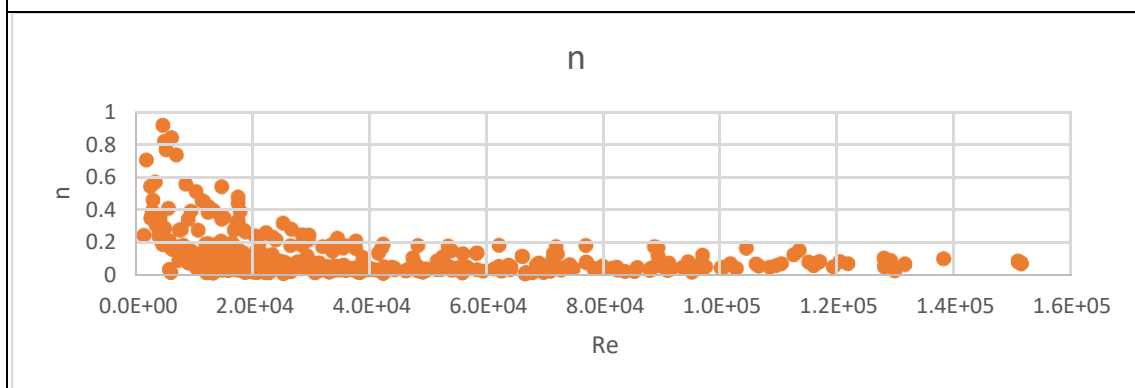
彙整現地水文資料分析後，得到下列結論：

(一) 曼寧粗糙係數

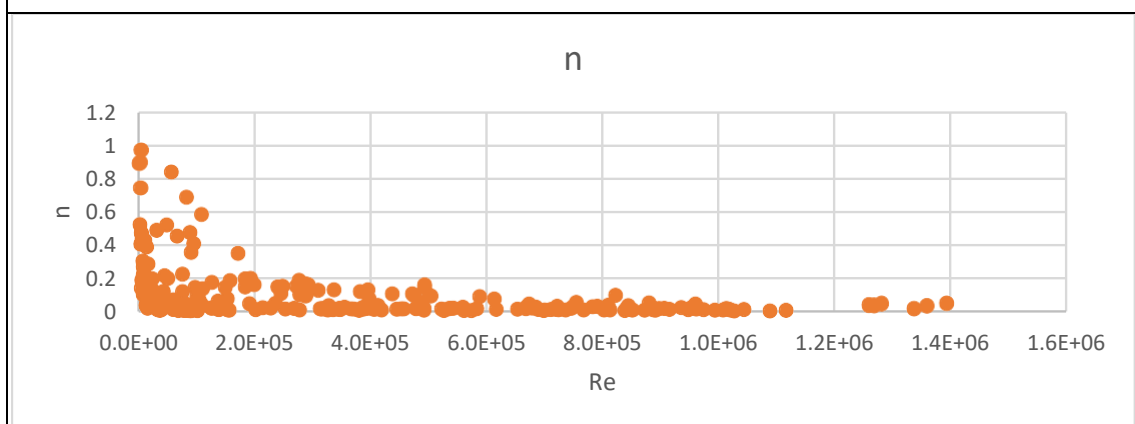
當流況進入完全紊流狀態時，層流次層(Laminar sublayer)厚度縮小至可以忽略不計，可以視為均勻流。一般參考穆迪圖(Moody chart)，粗糙高度越大越容易不受雷諾數影響成為定值。當 $k/d = 1.5 \times 10^{-2}$, $R_e > 6 \times 10^5$ 即可視為完全粗糙管流之紊流狀態，亦即均勻流狀態。換算成渠道流，因為 $D = 4R$ ，則有當 $k/R = 6 \times 10^{-2}$, $R_e > 1.5 \times 10^5$ 。三樣區之曼寧粗糙係數都隨雷諾數增加而減少。其中，猴猴坑當雷諾數大於150,000時，平均曼寧粗糙係數趨近於0.073；福德坑為0.068；打鐵坑則趨近於0.042。圖 4-10 為曼寧粗糙係數對雷諾數關係圖。



a. 曼寧粗糙係數對雷諾數關係圖(猴猴坑)



b. 曼寧粗糙係數對雷諾數關係圖(福德坑)

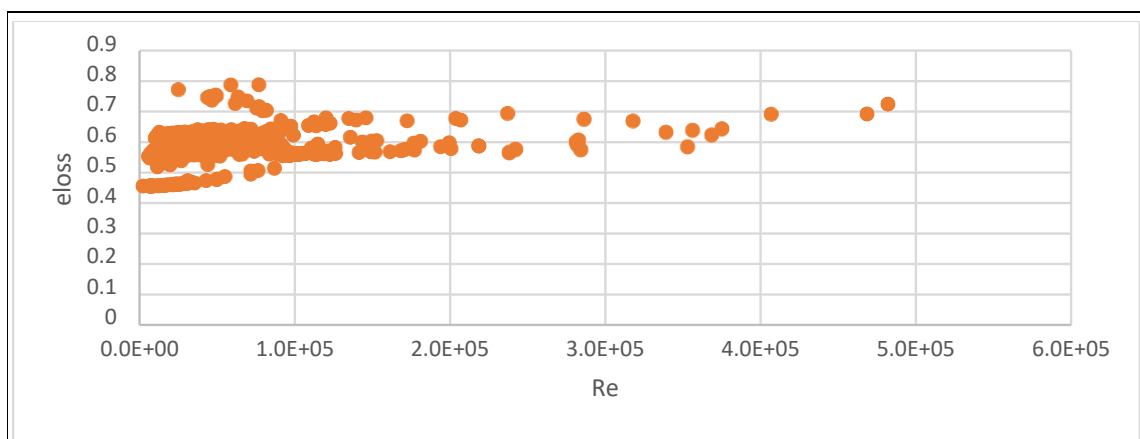


c. 曼寧粗糙係數對雷諾數關係圖(打鐵坑)

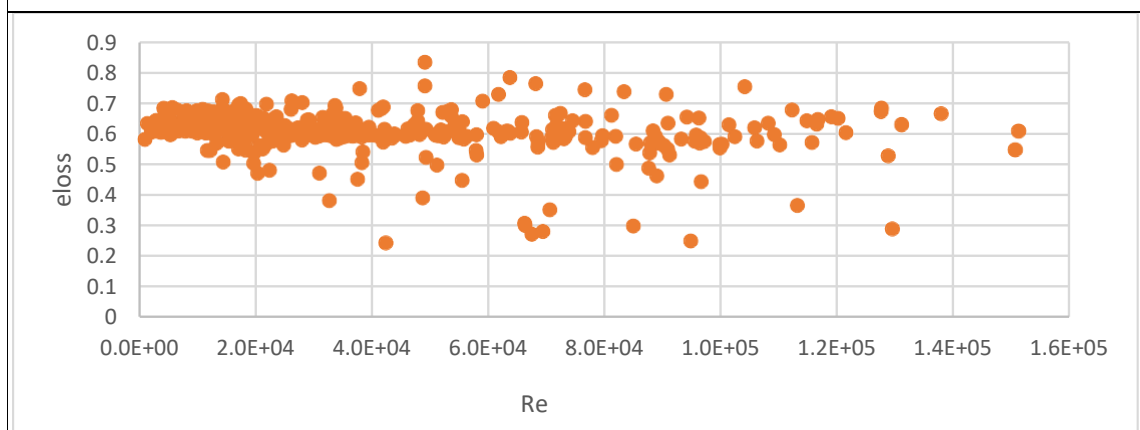
圖 4-10 曼寧粗糙係數對雷諾數關係圖

(二) 能量損失

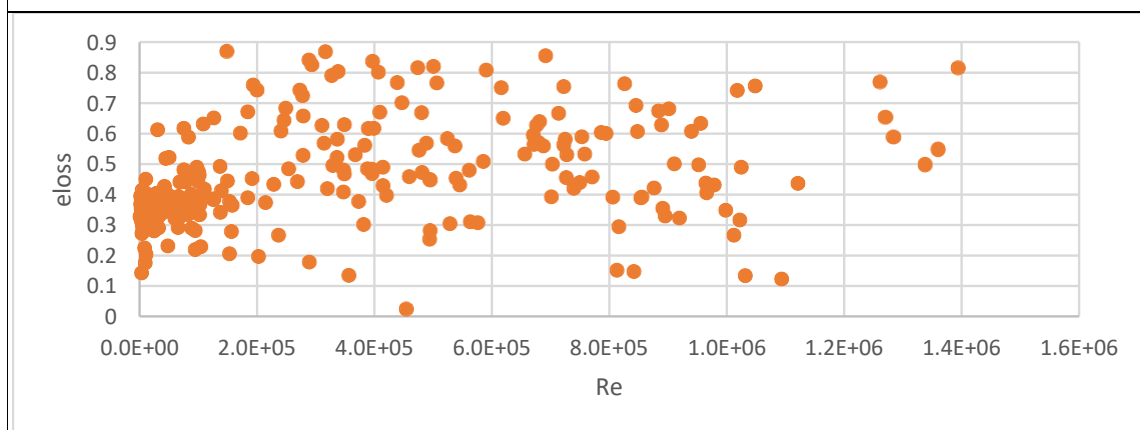
能量損失對雷諾數關係點位較為分散，大致上呈現一平均值：猴猴坑 為 0.5768、福德坑為 0.6251，打鐵坑為 0.4024。圖 4-11 為能量損失對雷諾數關係圖。



a. 能量損失對雷諾數關係圖(猴猴坑)



b. 能量損失對雷諾數關係圖(福德坑)

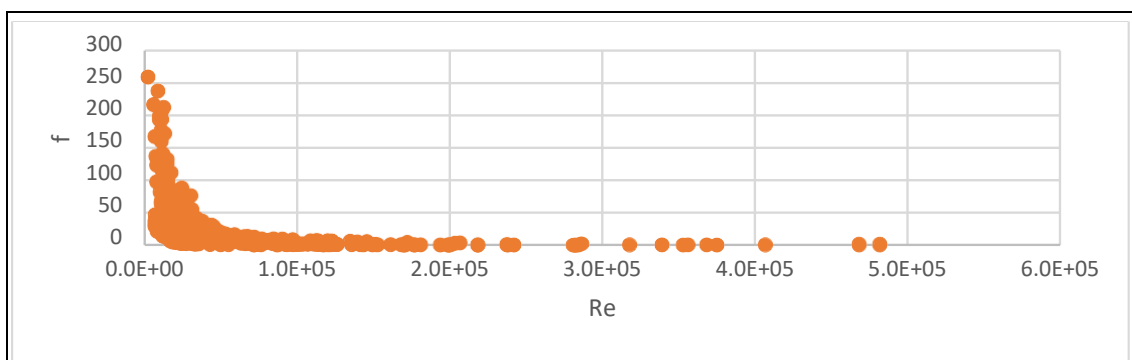


c. 能量損失對雷諾數關係圖(打鐵坑)

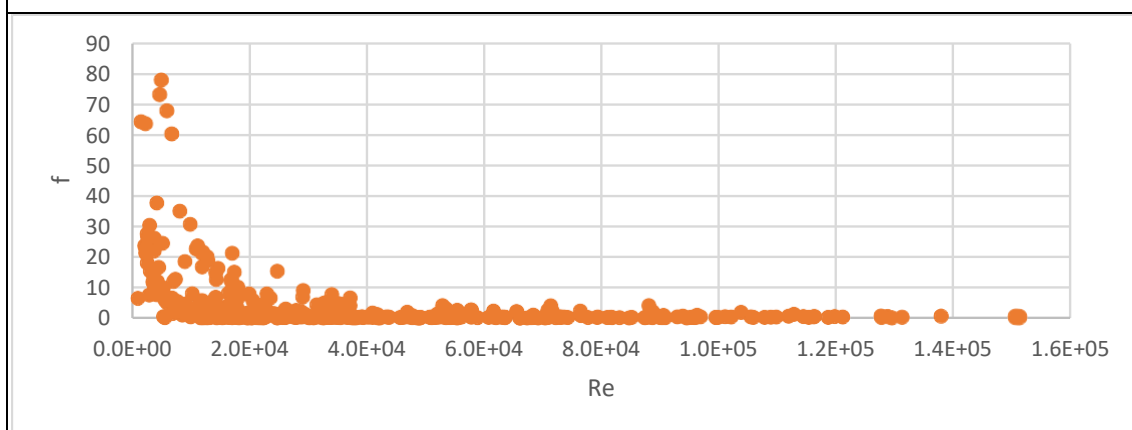
圖 4-11 能量損失對雷諾數關係圖

(三) 達西-韋斯巴哈粗糙係數

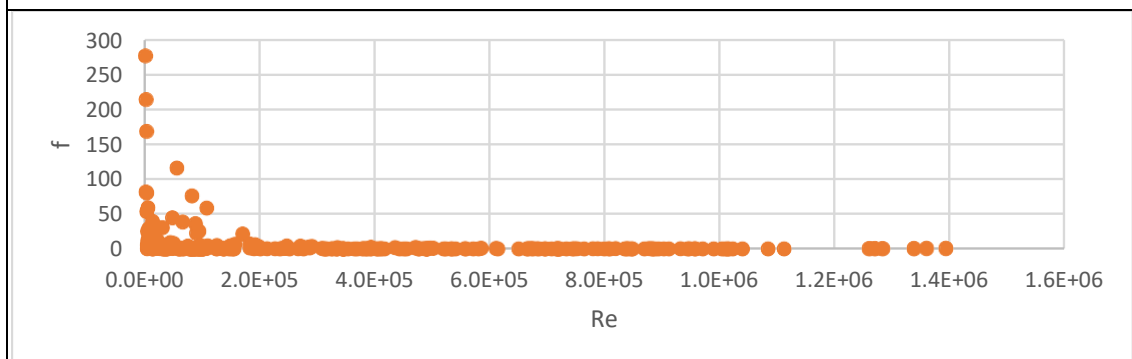
三樣區之達西-韋斯巴哈粗糙係數都隨雷諾數增加而減少，猴猴坑當雷諾數大於 150,000 時，平均達西-韋斯巴哈粗糙係數趨近於 1.682；福德坑為 0.591；打鐵坑則趨近於 0.374。圖 4-12 為達西-韋斯巴哈粗糙係數對雷諾數關係圖。



a. 達西-韋斯巴哈粗糙係數對雷諾數關係圖(猴猴坑)



b. 達西-韋斯巴哈粗糙係數對雷諾數關係圖(福德坑)



c. 達西-韋斯巴哈粗糙係數對雷諾數關係圖(打鐵坑)

圖 4-12 達西-韋斯巴哈粗糙係數對雷諾數關係圖

(四) 福祿數

雷諾數為慣性力與粘滯力之比值；福祿數則是慣性力與重力之比值。雷諾數大小可以判斷層流、漸變段與紊流之範圍。福祿數則是判斷亞臨界流、臨界流與超臨界流之無因次參數。對照三樣區之福祿數對雷諾數之關係可知，紊流流況下包含超臨界流、臨界流和亞臨界流。猴猴坑之福祿數對雷諾數之迴歸式如下：

$$\ln y = 3.86 \times 10^{-6} \cdot \ln x + 0.0098 \quad (4-52)$$

表 4-8、表 4-9 與表 4-10 為猴猴坑福祿數對雷諾數迴歸統計、ANOVA 成果和 X 變數與截距成果等相關表格。

表 4-8 猴猴坑福祿數對雷諾數迴歸統計表

迴歸統計				
R 的倍數	R 平方	調整的 R 平方	標準誤	觀察值個數
0.89271	0.79694	0.79636	0.14698	353

表 4-9 猴猴坑福祿數對雷諾數 ANOVA 成果表

ANOVA					
	自由度	SS	MS	F	顯著值
迴歸	1	29.75814	29.75814	1377.508	1.5E-123
殘差	351	7.582613	0.021603		
總和	352	37.34075			

表 4-10 猴猴坑福祿數對雷諾數 X 變數與截距成果表

	係數	標準誤	t 統計	P-值	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
截距	0.009796	0.010639	0.920747	0.357815	-0.01113	0.030721	-0.01113	0.030721
X 變數 1	3.86E-06	1.04E-07	37.11479	1.5E-123	3.65E-06	4.06E-06	3.65E-06	4.06E-06

福德坑之福祿數對雷諾數之迴歸式如下：

$$\ln y = 6.72 \times 10^{-6} \cdot \ln x + 0.0059 \quad (4-53)$$

表 4-11、表 4-12 與表 4-13 和為福德坑福祿數對雷諾數迴歸統計、ANOVA 成果和 X 變數與截距成果等相關表格。

表 4-11 福德坑福祿數對雷諾數迴歸統計表

迴歸統計				
R 的倍數	R 平方	調整的 R 平方	標準誤	觀察值個數
0.36586	0.13386	0.13166	0.55781	397

表 4-12 福德坑福祿數對雷諾數 ANOVA 成果表

ANOVA					
	自由度	SS	MS	F	顯著值
迴歸	1	18.99392	18.99392	61.04373	5.1E-14
殘差	395	122.9053	0.311153		
總和	396	141.8992			

表 4-13 福德坑福祿數對雷諾數 X 變數與截距成果表

	係數	標準誤	t 統計	P-值	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
截距	0.550879	0.044345	12.42266	3.88E-30	0.463698	0.63806	0.463698	0.63806
X 變數 1	6.72E-06	8.6E-07	7.813048	5.1E-14	5.03E-06	8.41E-06	5.03E-06	8.41E-06

打鐵坑之福祿數對雷諾數之迴歸式如下：

$$\mathcal{R}_y = 1.25 \times 10^{-6} \cdot R_e + 0.5676 \quad (4-54)$$

表 4-14、表 4-15 與表 4-16 為打鐵坑福祿數對雷諾數迴歸統計、ANOVA 成果和 X 變數與截距成果等相關表格。

表 4-14 打鐵坑福祿數對雷諾數迴歸統計表

迴歸統計				
R 的倍數	R 平方	調整的 R 平方	標準誤	觀察值個數
0.581807	0.3385	0.335833	0.618078	250

表 4-15 打鐵坑福祿數對雷諾數 ANOVA 成果表

ANOVA					
	自由度	SS	MS	F	顯著值
迴歸	1	48.4804	48.4804	126.9054	4.81E-24
殘差	248	94.74093	0.38202		
總和	249	143.2213			

表 4-16 打鐵坑福祿數對雷諾數 X 變數與截距成果表

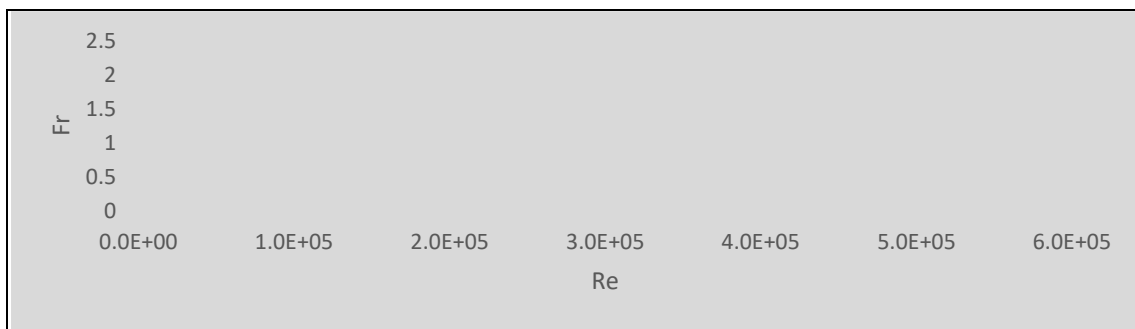
	係數	標準誤	t 統計	P-值	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
截距	0.567616	0.056078	10.12198	2.21E-20	0.457167	0.678066	0.457167	0.678066
X 變數 1	1.25E-06	1.11E-07	11.26523	4.81E-24	1.04E-06	1.47E-06	1.04E-06	1.47E-06

雖然觀測資料可以推導出三樣區之福祿數與雷諾數關係式，基於這兩個無因次參數之定義，回歸式是不具任何物理意義。圖 4-13 為福祿數對雷諾數關係圖，表 4-17 為三種鋪面材質之粗糙係數成果表。

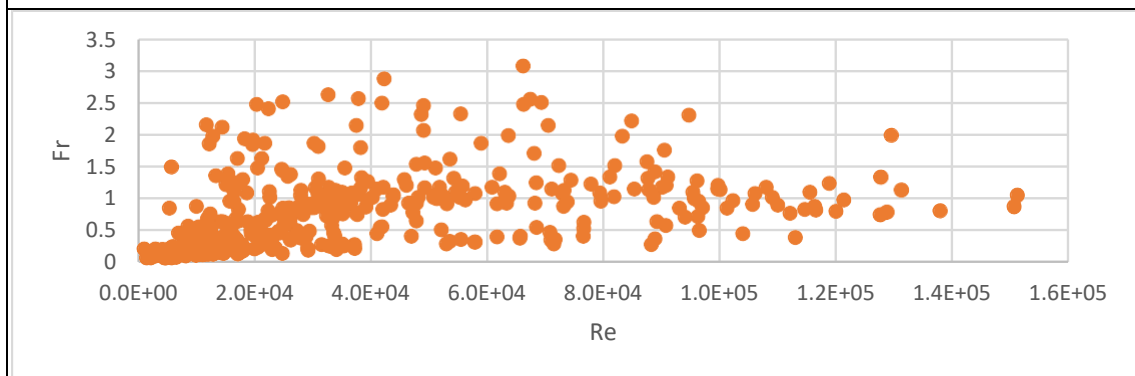
表 4-17 三種鋪面材質之粗糙係數成果

項目 \ 材質	造型模板混凝土護岸	砌石護岸	生態槽混搭造型模板護岸
曼寧粗糙係數	隨雷諾數增加而減少，最後趨近於 0.073	隨雷諾數增加而減少，最後趨近於 0.068	隨雷諾數增加而減少，最後趨近於 0.042
能量損失	平均值 0.58	平均值 0.63	平均值 0.40
達西-韋斯巴哈粗糙係數	隨雷諾數增加而減少，最後趨近於 1.682	隨雷諾數增加而減少，最後趨近於 0.591	隨雷諾數增加而減少最後趨近於 0.374
福祿數對雷諾數	$\log_e$ = $3.86 \times 10^{-6} \cdot \log_e$ + 0.0098	$\log_e$ = $6.72 \times 10^{-6} \cdot \log_e$ + 0.0059	$\log_e$ = $1.25 \times 10^{-6} \cdot \log_e$ + 0.5676

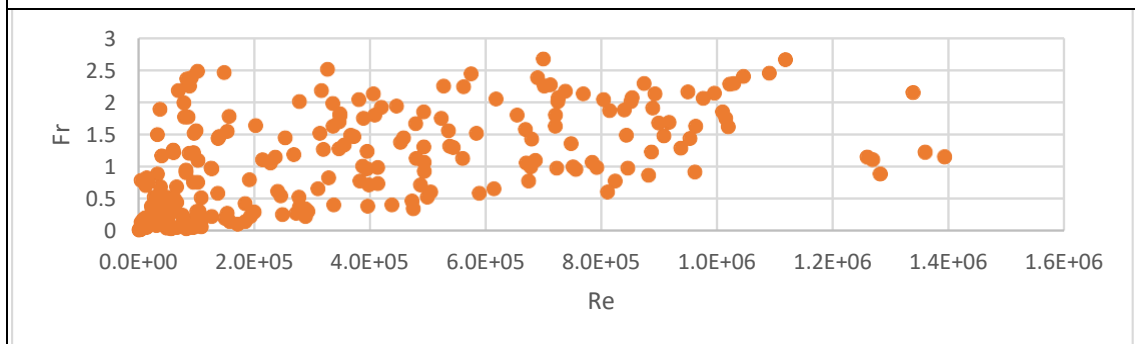
砌石護岸之粗糙係數與造型模板混凝土護岸相近，主要是福德坑之底床與護岸都是修整方石；猴猴坑則是年代久遠之造型模板護岸，底床則是破碎之水泥封底。打鐵坑之設計洪峰水位以下為新建造型模板護岸，因為收集到之水位較低，細礫石河床之粗糙係數最小。



a.福祿數對雷諾數關係圖(猴猴坑)



b.福祿數對雷諾數關係圖(福德坑)



c.福祿數對雷諾數關係圖(打鐵坑)

圖 4-13 福祿數對雷諾數關係圖

四、複合式粗糙係數試驗文獻回顧

Flintharm & Carling (1992)藉由梯形渠槽從事合板、0.24 英吋和 0.55 英吋礫石等三種不同材質之水槽試驗，得到使用不同之 n 值可以比平均 n 值有更高準確度之結論。他們在探討 Horton, Colebatch, Pavlovskii and Lotter 等 4 個模式後，得到 Pavlovskii 模式最準確，Horton and Colebatch 模式尚可，Lotter 模式表現差之結論。平均流速假設條件之模式比其他模式一致；流量假設條件模式之表現比較不一致。目前還沒有證據證明哪一個模式明顯比其他模式優勢。

Djajadi (2009)藉由 4 米長，5 厘米寬，邊坡 45 度梯形水槽，在 0.005 坡度下，以石膏、不同尺寸礫石組合，探討下列 9 種複合式粗糙係數模式與試驗結果之差異，得到以下如表 4-18 之結論：石膏底床、細礫石邊坡以 Yen 1 最佳；石膏底床、中礫石邊坡以 Yen 2 最佳；石膏底床、粗礫石邊坡以 Yen 1 最佳；細礫石底床、粗礫石邊坡以 Cox 和 Colebatch 最佳。4 種試驗組合之誤差在 10%以下者有 Horton, Felkel 和 Yen1 等 3 個模式。

Tullis (2012)在 48 英尺長，4 英尺寬，3 英尺深之可調坡、矩形試驗水槽內，從事 0.00006 英吋厚之壓克力板、金屬板條、3.5 英吋長、4 英吋寬、1.5 英吋高木塊，1.5 英吋頂寬、4.5 英吋底寬、1.5 英吋高、間距 1.5 英吋之梯形波紋片。試驗流量範圍為 0.24~23 cfs。除了對數分布模式外，以水槽試驗探討 16 種模式之適用性。

Soong & DePue (1996)依據 40 英尺單一斷面、700 英尺與 800 英尺複式斷面等 3 個測站之觀測結果得到 n 值隨水位高而增加；而且 Yen1 和 Lotter 模式為 n 值包絡線之上、下界線。Soong & Hoffman (2002)觀測美國伊利諾州之 Embarras River 河岸林之粗糙係數，採用較為適合之 Petryk & Bosmajian (1975) 如下：

$$\frac{V}{L} = n_b \sqrt[4]{\frac{C_d \sum A_i}{2gA n_b}} \quad (4-55)$$

式中， n_b 為底床粗糙係數； C_d 為植生拖曳係數； A_i 為水流方向第 i 種植物之投影面積； g 為重力加速度； A 為橫斷面面積； L 為渠道長度。

Pradhan & Khatua (2014) 藉由水槽試驗、FCF (UK Flood Channel Facility) 資料庫和天然河川觀測資料，探討複式斷面之複合式粗糙係數模式之適用性。得到下列表 4-18 之結論：

平滑主河槽之粗糙係數會隨水位增加而增加；由於河槽和洪水平原不同之粗糙度和動量轉移之複合作用，導致較為粗糙洪水平原上之粗糙係數會隨水位增加而增加，接著減少。改善後之 Lotter 模式比其他複合式粗糙係數模式較適用於複式斷面。

表 4-18 Pradhan & Khatua 分析成果

	Flintharm & Carling (1992)	Djajadi (2009)	Tullis (2012)
Horton	尚可	佳	佳
Colebatch	尚可		佳
Pavlovskii	佳		
Felkel		佳	
Yen 1		佳	
F4			佳
U*1			佳
Yen 3			佳

資料來源：Pradhan, S. & K.K. Khatua, Composite Roughness for Rough Compound Channels River Flow, CRC Press, 2014

Pradhan & Khatua 將此 8 種模式依據濕周、濕周與水力半徑與面積等三類參數，可分類如下：

(一) 濕周參數

1. Horton (1933), Einstein (1934) (HEC-RAS 採用)

$$n_{\text{Horton}} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i^{3/2}}{P} \quad (4-56)$$

2. Pavlovskii (1931)

$$n_{\text{Pavlovskii}} = r \frac{\sum_{i=1}^N n_i^{2.5}}{P} \quad (4-57)$$

3. Felkel (1960)

$$n_{\text{Felkel}} = \frac{P}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (4-58)$$

4. Yen (1991)

$$n_{\text{Yen}} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{P} \quad (4-59)$$

(二) 濕周與水力半徑參數

1. Yen 3 (1991)

$$\frac{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{1/3}}{P^{1/3}} \quad (4-60)$$

2. U^*

$$\frac{\sum_{i=1}^N n_i R_i^{1/2}}{P^{1/2}} \quad (4-61)$$

3. F_4

$$\frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 R_i^{2/3}}{P^{2/3}} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 R_i^{2/3}}{P^{2/3}} \quad (4-62)$$

(三) 面積參數

1. Colebatch (1941)

$$\frac{\sum_{i=1}^N A_i n_i^{3/2}}{A} \quad (4-63)$$

式中， U 、 U_b 、 U_w 分別為全斷面、底床、護岸之流速；

R 、 R_b 、 R_w 分別為全斷面、底床、護岸之水力半徑；

S 、 S_b 、 S_w 分別為全斷面、底床、護岸之坡度；

Q 、 Q_b 、 Q_w 分別為全斷面、底床、護岸之流量；

p 、 p_b 、 p_w 分別為全斷面、底床、護岸之濕周；

n 、 n_b 、 n_w 分別為全斷面、底床、護岸之曼寧粗糙係數；

A 、 A_f 分別為全斷面面積；底床、邊壁權重面積。

由於複合式粗糙係數之水槽試驗需要龐大經費與合適規格之試驗渠槽設備，以及長時間之天然河川觀測資料校驗方得以完成，因此，本計畫在尚未獲得足夠經費執行相關試驗下，初步依據目前所蒐集到之國外試驗成果，及其相關分析結論，將複合式粗糙係數模式分為濕周參數、濕周與水力半徑參數，以及面積參數等三類型。其中，濕周參數以 Horton 模式代表；濕周與水力半徑參數以 Yen 3 模式，面積參數以 Colebatch 模式代表分析討論。

五、寬深比對複合式粗糙係數影響

雖然許多學者專家藉由水槽試驗擬求得最佳適用模式，到目前為止，既有文獻都呈現不同模式在不同特定條件下有其優於其他模式之適用性。鑒於河床寬度和水深的比值越大，邊坡或護岸材質對複合式粗糙係數的影響越小，因此，本計畫嘗試從這 8 個模式中找出可以忽略邊坡或護岸材質影響複合式粗糙係數的寬深比，以及護岸材質與河床質的比值對複合式粗糙係數的影響。

這 8 個模式依其主要參數別可以分濕周參數、濕周、水力半徑參數，以及面積參數等三大類。將其重新整理成濕周比率、糙度比率和面積比率等三參數時，可以表示如下：

(一) 濕周參數

1. Horton (1933), Einstein (1934)

$$\begin{aligned} n^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N n_i^3}{P} \\ \rightarrow n &= \frac{n_B^{3/2} + n_w^{3/2}}{P} \quad \rightarrow \frac{n}{n_B} = \left(\frac{n_B}{P}\right)^{2/3} (1 + n_y \cdot n_y^{3/2})^{2/3} \\ \rightarrow \frac{n}{n_B} &= \left(\frac{1}{1 + P_y}\right)^{2/3} (1 + \frac{n_y}{P_y} \cdot n_y^{3/2})^{2/3} \end{aligned} \quad (4-64)$$

HEC-RAS Hydraulic Reference Manual (2025) 採用此模式計算複合式粗糙係數。

2. Pavlovskii (1931)

$$n^2 = r \frac{\sum_{i=1}^N n_i^3}{P} \quad \rightarrow \frac{n}{n_B} = \frac{n_B^{2/3} + n_w^{2/3}}{P} \quad \rightarrow \frac{n}{n_B} = \frac{n_B^{2/3} + n_w^{2/3}}{P} \quad \rightarrow \frac{n}{n_B} = \frac{n_B^{2/3} + n_w^{2/3}}{P}$$

$$\rightarrow \frac{n_B}{n_B} = \left(\frac{1}{P} \right)^{1/2} (1 + \gamma \cdot \gamma^2)^{1/2} \rightarrow \frac{n}{n_B} = \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^{1/2} (1 + \gamma \cdot \gamma^2)^{1/2} \quad (4-65)$$

3. Felkel (1960)

$$\begin{aligned} \frac{P}{\sum_{i=1}^N \frac{P}{h_i}} &\rightarrow \frac{P}{\frac{P}{n_B} + \frac{P}{n_w}} \\ \rightarrow \frac{n}{n_B} &= \left(\frac{P}{P_B} \right) \frac{n_y}{n_y + P_y} \rightarrow \frac{n}{n_B} = (1 + \gamma) \frac{n_y}{n_y + P_y} \end{aligned} \quad (4-66)$$

4. Yen 1 (1991)

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^N n_i \gamma_i}{P} &\rightarrow \frac{n_B \gamma_B + \gamma_w \gamma_w}{P} \rightarrow \frac{\gamma_B}{n_B} = \left(\frac{1}{P} \right) (1 + \gamma \cdot \gamma_y) \\ \rightarrow \frac{n}{n_B} &= \left(\frac{1}{1 + P_y} \right) (1 + \gamma \cdot \gamma_y) \end{aligned} \quad (4-67)$$

(二) 濕周、水力半徑參數

由於水力半徑為面積對濕周之比值，因此，需要定義底床濕周與邊坡 濕周所影響之面積。一般以邊坡坡度平分線劃分邊坡和底床濕周所影響之 面積；當兩條平分線之交會點位於水面下，亦即水面寬小於邊坡濕周時，邊 坡和底床濕周影響面積即以該交會點垂直延伸至水面為界點，邊坡坡腳和 界點之連接線即為邊坡濕周和底床濕周影響面積之分界線。

1. Yen 3 (1991)

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^N n_i \gamma_i R_i^{1/3}}{P \gamma^{1/3}} &\rightarrow \frac{n_B \gamma_B^{1/3} + \gamma_w \gamma_w^{1/3}}{R_B^{1/3} P \gamma^{1/3}} \\ &\rightarrow \frac{n_B \gamma_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{1/3} + \gamma_w \gamma_w \left(\frac{A_w}{P} \right)^{1/3}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \rightarrow \bar{n} = \frac{n_B \bar{n}_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{1/3}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/3}} + \frac{n_w \bar{n}_w \left(\frac{A_w}{P} \right)^{1/3}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/3}} \\
& \rightarrow \bar{n} = \bar{n}_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{2/3} \left(\frac{A}{P} \right)^{1/3} + \bar{n}_w \left(\frac{A_w}{P} \right)^{2/3} \left(\frac{A}{P} \right)^{1/3} \\
& \rightarrow \frac{n}{n_B} = \left(\frac{\bar{n}_B}{P} \right)^{2/3} \left(\frac{A_B}{A} \right)^{1/3} (1 + \bar{n}_w^{2/3} \cdot \bar{n}_y^{1/3} \cdot n_y) \\
& \rightarrow \frac{n}{n_B} = \left(\frac{1}{1+P_y} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{1+A_y} \right)^{1/3} (1 + \bar{n}_w^{2/3} \cdot \bar{n}_y^{1/3} \cdot n_y) \quad (4-68)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{when } \bar{n}_w < \bar{n}_B \rightarrow \bar{n}_B + 2y \bar{n}_w = 2y \cdot \sqrt{1 + \bar{n}_w^2} \cdot \bar{n}_y + \bar{n}_y z \\
& \rightarrow A = 1 + \bar{n}_w \bar{n}_y = \frac{z}{\sqrt{1 + \bar{n}_w^2}} \quad (4-69)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{when } \bar{n}_w > \bar{n}_B \rightarrow \bar{n}_w + 2y \bar{n}_B = 2y \cdot \sqrt{1 + \bar{n}_w^2} \cdot \bar{n}_y + \bar{n}_y z > 1 \\
& A = \bar{n}_B \left[\frac{P^2}{z a P + (\bar{n}_w - a) P^2} \right] \quad (4-70)
\end{aligned}$$

2. U*1

$$\begin{aligned}
& \bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \bar{n}_i R_i^{1/2}}{P \bar{n}^{1/2}} \rightarrow \bar{n} = \frac{n_B \bar{n}_B^{1/2} + \bar{n}_w \bar{n}_w^{1/2} R_w^{1/2}}{R_B P \bar{n}^{1/2}} \\
& \rightarrow \bar{n} = \frac{n_B \bar{n}_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{1/2}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/2}} + \frac{\bar{n}_w \bar{n}_w \left(\frac{A_w}{P} \right)^{1/2}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/2}} \\
& \rightarrow \bar{n} = \frac{n_B \bar{n}_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{1/2}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/2}} + \frac{n_w \bar{n}_w \left(\frac{A_w}{P} \right)^{1/2}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{1/2}} \\
& \rightarrow \frac{n}{n_B} = \frac{\bar{n}_B^{1/2} A_B^{1/2}}{\bar{n}_B \left(\frac{A}{P} \right)^{1/2}} + \frac{\bar{n}_w^{1/2} A_w^{1/2}}{A_B \left(\frac{A}{P} \right)^{1/2}} \quad (4-46)
\end{aligned}$$

A

$$)^{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \gamma \right)$$

$$\rightarrow \frac{n}{n_B} = \left(\frac{1}{1+P_Y} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{1+A_Y} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{2} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (4-71)$$

$$\text{when } \frac{1}{2} < \frac{1}{\gamma} \rightarrow \frac{1}{n_B} + 2y \frac{1}{2} = 2y \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \frac{1}{2}} \frac{\frac{1}{2} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \gamma z}{\frac{1}{2} \frac{1}{2}} = 1$$

$$\rightarrow \frac{A_Y}{\gamma} = 1 + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma} \frac{1}{2} = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} \quad (4-72)$$

$$\text{when } \frac{1}{2} > \frac{1}{\gamma} \rightarrow \frac{1}{n_B} + 2y \frac{1}{2} > 2y \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \frac{1}{2}} \frac{z}{\frac{1}{2} \frac{1}{2}} > 1$$

$$A_Y = \frac{P^2}{2aP_Y + (z-a)P_Y^2} \quad (4-73)$$

3. F4

$$= \frac{\sum_{i=1}^N n_i^2 \frac{1}{2} R_i^{2/3}}{P^{2/3}} \rightarrow \frac{n_B^2 \frac{1}{2} R_B^{2/3} + \frac{1}{2} n_w^2 R_w^{2/3}}{P^{2/3}}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} = \left[n_B \frac{A_B}{P} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} n_w \frac{A_w}{P} \frac{1}{2} \right]^{1/2}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} = \left[\frac{2P \left(\frac{A_B}{P} \right)^{2/3} + \frac{1}{2} 2P \left(\frac{A_w}{P} \right)^{2/3}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3}} \right]^{1/2}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} = \left[n_B \frac{A_B}{P} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} n_w \frac{A_w}{P} \frac{1}{2} \right]^{1/2}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} = \left[\frac{2P \left(\frac{A_B}{P} \right)^{2/3} + \frac{1}{2} n^2 P \left(\frac{A_w}{P} \right)^{2/3}}{P \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3}} \right]^{1/2}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} = n_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{1/3} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} n_w \left(\frac{A_w}{P} \right)^{1/3} \frac{1}{2}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} = n_B \left(\frac{A_B}{P} \right)^{1/3} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{2} \right)^{1/2}$$

$$\cdot \gamma)1$$

$$\rightarrow \frac{n_B}{n_B} = \left(\frac{1}{P}\right)^{1/6} \left(\frac{A_B}{A}\right)^{1/3} \left(1 + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{\gamma} \cdot \frac{1}{2}\right)^{1/3}$$

$$\rightarrow \frac{n}{n_B} = \left(\frac{1}{1+P_\gamma}\right)^{1/6} \left(\frac{1}{1+A_\gamma}\right)^{1/3} \left(1 + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{\gamma} \cdot \frac{1}{2}\right)^{1/3} \quad (4-74)$$

$$where \gamma < \gamma_w \rightarrow \gamma_B + 2\gamma \equiv 2\gamma \cdot \frac{1}{1 + \gamma^2} \frac{\gamma^2 + \gamma^2}{\gamma^2} \equiv 1$$

$$A_Y = 1 + \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} \quad (4-75)$$

$$\text{when } \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} > \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}} \rightarrow \frac{A_B + 2y}{2y\sqrt{1+z^2}} > \frac{\frac{z}{\sqrt{1+z^2}} + \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}}}{\frac{z}{\sqrt{1+z^2}}} > 1$$

$$A_Y = \frac{P^2}{2aP_Y + (z-a)P_Y^2} \quad (4-76)$$

(三) 面積參數

1. Colebatch (1941)

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^N A_i n_i^{3/2}}{A} &\rightarrow \frac{A_B n_B^{3/2} + \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}} n_w^{3/2}}{A} \\ \rightarrow \frac{A n_B^{3/2}}{A} + \frac{A n_w^{3/2}}{A} &\rightarrow \frac{A_B}{A} \left(\frac{A_B}{A} \right)^{3/2} \left(1 + \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}} \right)^{2/3} \\ \rightarrow \frac{n}{n_B} &= \left(\frac{A_B}{A} \right)^{2/3} \left(1 + \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}} \right)^{2/3} \\ \rightarrow \frac{n}{n_B} &= \left[\frac{aP_Y}{A_Y(2a+zP_Y)} \right]^{2/3} \left(1 + \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} \right)^{2/3} \quad (4-77) \end{aligned}$$

$$\text{when } \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} < \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}} \rightarrow \frac{A_B + 2y}{2y\sqrt{1+z^2}} < \frac{\frac{z}{\sqrt{1+z^2}} + \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}}}{\frac{z}{\sqrt{1+z^2}}} < 1$$

$$A_Y = 1 + \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} \quad (4-78)$$

$$\text{when } \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} > \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}} \rightarrow \frac{A_B + 2y}{2y\sqrt{1+z^2}} > \frac{\frac{z}{\sqrt{1+z^2}} + \frac{z_w}{\sqrt{1+z_w^2}}}{\frac{z}{\sqrt{1+z^2}}} > 1$$

$$A_Y = \frac{P^2}{2aP_Y + (z-a)P_Y^2} \quad (4-79)$$

式中，

$$\frac{z}{\sqrt{1+z^2}} = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}}, \quad \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} = \frac{z}{\sqrt{1+z^2}}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_w}{\gamma_B}, \quad n = \frac{n_w}{n_B}, \quad A = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2} A_w}{A_B}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\sigma_B}{P} &= \frac{1}{1 + \sigma_Y}, \quad \frac{A_B}{P} = \frac{1}{1 + \sigma_Y} \\
0.5\sigma_w &= \frac{A}{\alpha} \rightarrow \sigma_w = 2y \cdot \sqrt{1 + \sigma^2} = 2\alpha\sigma \\
\frac{\sigma_B}{\sqrt{1 + \sigma^2}} &= \frac{0.5\sigma_w}{\alpha} \rightarrow \sigma_w = 2y \cdot \sqrt{1 + \sigma^2} = 2\alpha\sigma \\
\rightarrow \frac{T}{y} \cdot \frac{\sigma_B + 2y\sigma}{\sigma} &= \frac{\sigma_B + \sigma_w z}{\alpha} = \frac{2(\sigma_B + \sigma_w z)}{\sigma_w} = \frac{2(\sigma_B + \sigma_Y z)}{\sigma_Y} \\
&= \frac{\alpha}{\frac{\sigma_w}{2\alpha}} \\
\sigma_w > \sigma \rightarrow \sigma_w > \sigma_B + \frac{2(\sigma_B + \sigma_w z)}{\alpha} \rightarrow 1 > \frac{\sigma_B + \sigma_Y z}{\sigma_Y} \\
2y\sigma &= \frac{2\alpha}{(T/y - 2z)} \quad (4-80)
\end{aligned}$$

當 $\sigma < \sigma_w$

$$\begin{aligned}
A_B &= 0.5\sigma_B \rightarrow \sigma_B = \frac{0.25\sigma_w \sigma_B}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \\
\sigma_B &= (\sigma_B + \sigma_Y) \sigma \rightarrow \frac{0.5\sigma_w \sigma_B}{\sigma_B + \sigma_Y} = \frac{0.5\sigma_w}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \\
A_w &= 0.5(\sigma_B + 2z\sigma) \sigma = 0.5 \left(\sigma_B + \frac{0.5\sigma_w}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \right) \frac{0.5\sigma_w}{\sigma^2} \\
A_Y &= \frac{A_w}{A_B} = \frac{0.5(\sigma_B + \frac{0.5\sigma_w}{\sqrt{1 + \sigma^2}}) \frac{0.5\sigma_w}{\sigma^2}}{\frac{0.25P}{\sqrt{1 + \sigma^2}}} = 1 + \frac{\sigma_Y z}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \\
\rightarrow A_Y &= 1 + \frac{z}{\sqrt{1 + z^2}} \quad (4-81)
\end{aligned}$$

當 $\sigma > \sigma_w$

$$A_w = \sigma^2 \cdot \sqrt{1 + \sigma^2} = \frac{0.25\sigma_w^2}{\sqrt{1 + \sigma^2}} \cdot \frac{0.25\sigma_w^2}{\alpha}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= (\sigma_B + \sigma_y) \sigma_{xx} \rightarrow & \frac{0.5 \sigma_w}{\sigma_{xx}} & \frac{0.5 \sigma_w}{\sigma_{xx}} & \frac{0.5 \sigma_w}{\sigma_{xx}} & \frac{0.25 \sigma_w}{\sigma_{xx}^2} \\
 &= (\sigma_B + \sigma_{xx}) \sigma_{xx} & & & & \\
 A_B = \sigma_{xx} - A_w &= \frac{0.5 \sigma_w}{\sigma_{xx}} + \frac{0.25 \sigma_w^2}{\sigma_{xx}^2} - \frac{0.25 \sigma_w}{\sigma_{xx}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \rightarrow \bar{z}_B = \frac{1}{\alpha^2} (0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 \bar{z}_w^2 - 0.25 \bar{z}_w^2) \\
& = \frac{1}{\alpha^2} [0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w^2] \\
& A = \frac{A_w}{A_B} = \frac{\frac{0.25 \bar{z}_w^2}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha^2} [0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w^2]} \\
& \rightarrow A_Y = \bar{z}_r \frac{0.25 \bar{z}_w^2}{0.5 \alpha \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w^2} - \frac{0.25 \bar{z}_w^2}{0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w^2} \\
& \rightarrow A_Y = \bar{z}_r \left[\frac{P_Y^2}{2aP_Y + (z-a)P_Y} \right] \quad (4-82)
\end{aligned}$$

當 $\bar{z}_w = 0$

$$\begin{aligned}
& \bar{z}_w = 1 \rightarrow A_Y \frac{\bar{z}_w^2}{2\bar{z}_w - \bar{z}_w} = 1 \quad fo \bar{z}_w = 1 \\
& \frac{A_w}{A_B} = \frac{\frac{0.25 \bar{z}_w^2}{\alpha}}{0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + \frac{0.25 \bar{z}_w^2}{\alpha^2}} = \frac{\bar{z}_w^2}{0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + \frac{0.25 \bar{z}_w^2}{\alpha^2}} = \frac{\bar{z}_w^2}{2\bar{z}_w + \bar{z}_w^2} \\
& \frac{A_B}{A_w} = \frac{1}{\alpha^2} [0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w^2] = \frac{0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w^2}{0.5 \bar{z}_w \bar{z}_B + 0.25 \bar{z}_w^2} \\
& = \frac{2\bar{z}_w + (\bar{z}_w^2 - \alpha) \bar{z}_w}{2\bar{z}_w + \bar{z}_w^2} = \frac{\bar{z}_w}{A_Y (2\bar{z}_w + \bar{z}_w^2)} \quad (4-84)
\end{aligned}$$

其中，符號之定義如表 4-19 所示。

表 4-19 方程式參數說明表

參數	說明	參數	說明	參數	說明
Ω_w	護岸濕周	Ω_B	河床濕周	Ω_γ	護岸、河床濕周比
n_w	護岸糙度	n_B	河床糙度	n_γ	護岸、河床糙度比
A_w	護岸面積	A_B	河床面積	A_γ	護岸、河床面積比
P	濕周	n	複合式粗糙係數	A	通水面積
y	水深	z	護岸坡度(1:z)	B	河床寬度

八模式之參數與指數蠻有規律，例如，濕周參數群模式之濕周指數包含 $2/3$ 、 $1/2$ 、 -1 和 1 。濕周、水力半徑參數群之水利半徑指數有 $1/3$ 和 $1/2$ 兩種；濕周指數也有 1 和 $1/2$ 兩種。面積參數之面積指數為 $2/3$ 。各模式之參數變化整理如表 4-20 所示。

濕周參數模式之主要參數為濕周，與邊坡或護岸坡度無關，不需要考慮邊坡或護岸坡度。濕周、水力半徑和面積參數模式由於邊坡或護岸坡度會影響水力半徑和面積大小，因此需要將邊坡或護岸坡度列入計算。表 4-21 為不同邊坡斜率之 α 、 β 值。

表 4-20 模式參數指數變化

Model	Parameters
Horton	$\Omega_i^{2/3}, n_i$
Pavlovskii	$\Omega_i^{1/2}, n_i$
Felkel	Ω_i^{-1}, n_i
Yen 1	Ω_i, n_i
Yen 3	$R_i^{1/3}, P_i, n_i$
U*1	$R_i^{1/2}, P_i, n_i$
F4	$R_i^{1/3}, P_i^{1/2}, n_i$
Colebatch	$A_i^{2/3}, n_i$

表 4-21 不同邊坡斜率之 α 、 β 值

z	$\overline{\alpha} = .j1 +$	$\overline{\beta} = z/.j1 +$
0	1	0
0.3	1.04	0.29
0.5	1.12	0.45
1	1.41	0.71

三類型 8 模式之 n_i 冪次都與複合式粗糙係數 n 之冪次一樣，都是 1.0。濕周群組 Horton, Pavlovskii, Felkel, 和 Yen 1 之 Ω_i 冪次依序為 2/3, 1/2, -1.0 和 1.0。濕周、水力半徑群組 Yen 3 和 U^*1 之 Ω_i 冪次都是 1.0； R_i 冪次依序為 1/3 和 1/2。F4 之 Ω_i 冪次為 1/2， R_i 冪次為 1/3。面積群組 Colebatch 之 A_i 冪次為 2/3。

理論上，當 $n_y = 1.0$ 時， $n/n_B = 1.0$ ，濕周群組 Horton、Pavlovskii、Yen 1 和 Felkel 等模式之 n/n_B 值不隨 T/y 或 z 而變，都維持 1.0。當 $n_y \neq 1.0$ 時，濕周群組 4 模式的 n/n_B 值隨 T/y 越大而越大，最後趨於 1.0。同一 T/y 值時，

n/n_B 值自大至小依序為 Pavlovskii、Horton、Yen 1 和 Felkel。其中，Pavlovskii、Horton、Yen 等三模式之 n/n_B 值較為接近，Felkel 之 n/n_B 值與其他三者相距較遠。 n_y 值越大，Felkel 之 n/n_B 值與其他三者相距變小。

舉 Horton 模式為例， $n_y = 1.0$ 時， $n/n_B = 1.0$ ，不隨 T/y 值改變。 $n_y > 1$ 時， n/n_B 值隨 T/y 值越大而越小，且趨近於 1.0。相反地，當 $n_y < 1$ 時， n/n_B 值隨 T/y 值越大而越大，且趨近於 1.0。當 $T/y \geq 10$ 時，無論 n_y 值大小， n/n_B 值對 T/y 值變率隨 T/y 值越大而越小，亦即越來越快收斂至 1.0。以邊坡坡度豎橫比 1:0 與 1:0.5 為例，兩者之 n/n_B 對 T/y 值趨勢一致，且其差值相差不多。

當 $n_y = 1.0$ 時，濕周、水力半徑群組 Yen 3、 U^*1 和 F4 等模式之 n/n_B 值雖然隨 T/y 而變，但都可視為 1.0。當 $z = 0$ 時， n/n_B 值介於 0.995~1.0 之間；當 $z = 0.5$ 時， n/n_B 值則介於 0.993~1.0 之間。由於水力半徑為面積對

濕周之比值，因此，需要計算底床濕周與邊坡濕周所影響之面積，並且以邊坡坡度平分線之交會點是否位於水面下為影響面積不同計算式之區分條件。因此，在小 T/y 值時，會有不同面積計算式之適用， n/n_B 值對 T/y 值之曲線 會有些微波動。當 n_y 等 1.0 時，濕周、水力半徑群組 3 模式的 n/n_B 值隨 T/y 越大而越大，最後趨於 1.0。同一 T/y 值時， n/n_B 值自大至小依序為 F4、U*1 和。其中，U*1 和 Yen3 等兩模式之 n/n_B 值較為接近，F4 之 n/n_B 值與其他二者相距較遠，且較接近 1.0。和濕周群組類似， n_y 值越大，F4 之 n/n_B 值與其他二者相距變小，但離 1.0 較遠。

舉 Yen 3 模式為例，和濕周群組類似， $n_y = 1.0$ 時， $n/n_B \cong 1.0$ ，不隨 T/y 值有太大改變。 $n_y > 1$ 時， n/n_B 值隨 T/y 值越大而越小，且趨近於 1.0。相反地，當 $n_y < 1$ 時， n/n_B 值隨 T/y 值越大而越大，且趨近於 1.0。當 $T/y \geq 10$ 時，無論 n_y 值大小， n/n_B 值對 T/y 值變率隨 T/y 值越大而越小，亦即越 來越快收斂至 1.0。

同樣地，以邊坡坡度豎橫比 1:0 與 1:0.5 為例，兩者之 n/n_B 對 T/y 值趨勢一致，且其差值相差不多。

與濕周群組類似，理論上，當 $n_y = 1.0$ 時，面積群組 Colebatch 之 $n/n_B = 1.0$ ， n/n_B 值不隨 T/y 或 z 而變，都維持 1.0。當 $n_y > 1$ 時， n/n_B 值 隨 T/y 值越大而越小，且趨近於 1.0。相反地，當 $n_y < 1$ 時， n/n_B 值 隨 T/y 值越大而越大，且趨近於 1.0。當 $T/y \geq 10$ 時，無論 n_y 值大小， n/n_B 值對 T/y 值變率隨 T/y 值越大而越小，亦即越來越快收斂至 1.0。同樣地，以邊坡坡度豎橫比 1:0 與 1:0.5 為例，兩者之 n/n_B 對 T/y 值趨勢一致，且其差值相差不多。

將 Horton，Yen3 與 Colebatch 於 $z=0.5$ 之 n/n_B 對 T/y 值繪製成圖可知，當 $n_y > 1$ 時，Yen 3 與 Colebatch 之 n/n_B 值很接近，比 Horton 小。當 $n_y < 1$ 時，三模式之 n/n_B 值差異不大，Colebatch 最小，接著依序為 Horton

和 Yen 3。亦即當 $n_y > 1$ 時，Horton 為包絡線最外圍； $n_y < 1$ 時，Yen 3 則

為包絡線最外圍。同樣地，當 $n_y > 1$ 或 $n_y < 1$ 時，Colebatch 都為包絡線最內緣。

如果保守估計，亦即以包絡線最外圍估算，則 $n_y > 1$ 且 $T/y < 30$ 時，建議依據 Horton 模式計算 n/n_B 值，當 $T/y \geq 30$ ， $n/n_B = 1.186 \rightarrow \square = 1.186n_B$ 。當 $n_y < 1$ 且 $T/y < 10$ 時，建議依據 Yen 3 模式計算 n/n_B 值，當 $T/y = 10$ ， $n/n_B = 0.857$ ； $T/y \geq 30$ ， $n/n_B = 0.947 \rightarrow \square = 0.947n_B$ 。無論 n_y 值大小，Colebatch 都是包絡線內緣最適合推薦採用之模式。當 $T/y < 10$ 時，建議依據模式計算 n/n_B 值。當 $n_y < 1$ 時， $T/y = 10$ ， $n/n_B = 0.93$ ； $T/y \geq 30$ ， $n/n_B = 0.976 \rightarrow \square = 0.976n_B$ 。同樣地，當 $n_y > 1$ 時， $T/y = 10$ ， $n/n_B = 1.279$ ； $T/y \geq 30$ ， $n/n_B = 1.1 \rightarrow \square = 1.1n_B$ 。不同 T/y 、 n_y 情況下之 n/n_B 值如表 4-22 所示。三模式於不同 T/y 、 n_y 情況下之 n/n_B 變化如圖 4-14、圖 4-15 和圖 4-16 所示。圖 4-17 為三模式於 $T/y=10$ 和 30 之 n/n_B 變化。三模式於不同 T/y 、 n_y 情況下之 n/n_B 變化則彙整於圖 4-18。表 4-22 之最大(Max)、最小值(Min)係水保手冊粗糙係數表中之最大、最小值。

表 4-22 不同 T/y 、 n_y 情況下之 n/n_B 值

$T/y < 10$	$n_y < 1$	Max	Colebatch	$n/n_B = 0.93$
		Min	Yen 3	$n/n_B = 0.857$
	$n_y > 1$	Max	Horton	$n/n_B = 1.461$
		Min	Colebatch	$n/n_B = 1.279$
$T/y \geq 30$	$n_y < 1$	Max	Colebatch	$n/n_B = 0.976$
		Min	Yen 3	$n/n_B = 0.947$
	$n_y > 1$	Max	Horton	$n/n_B = 1.186$
		Min	Colebatch	$n/n_B = 1.1$

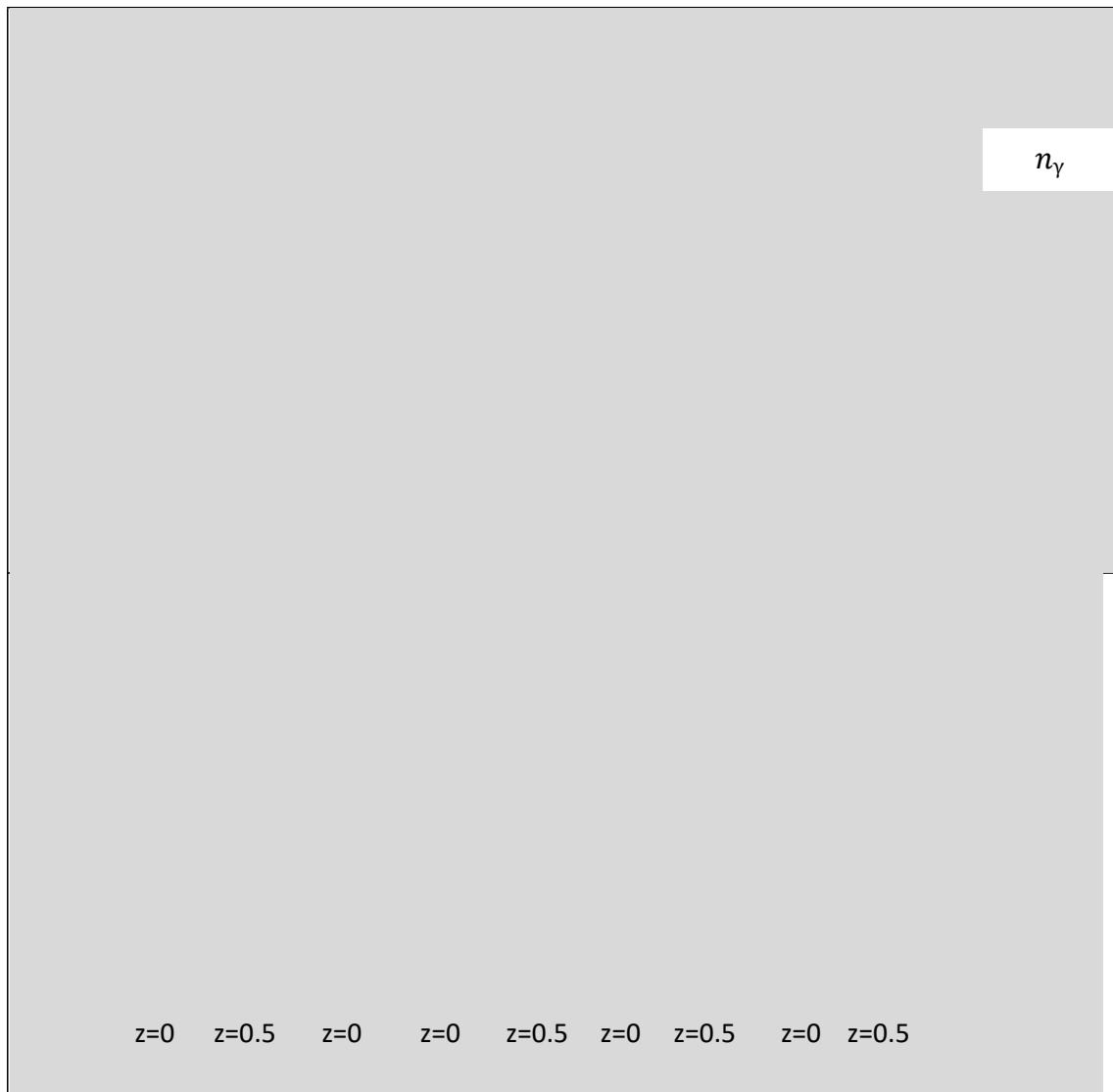


圖 4-14 不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化(Horton)

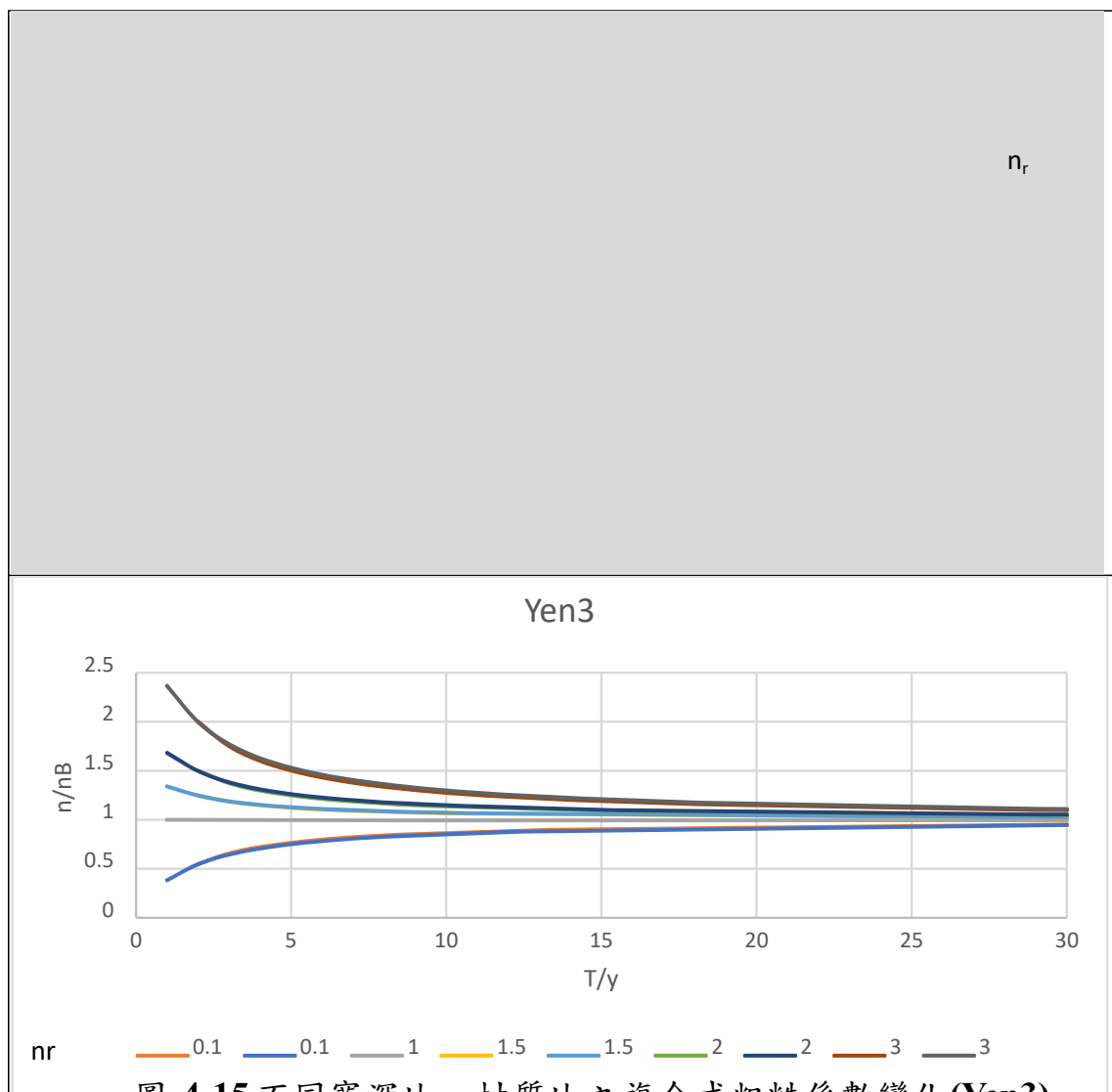


圖 4-15 不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化(Yen3)

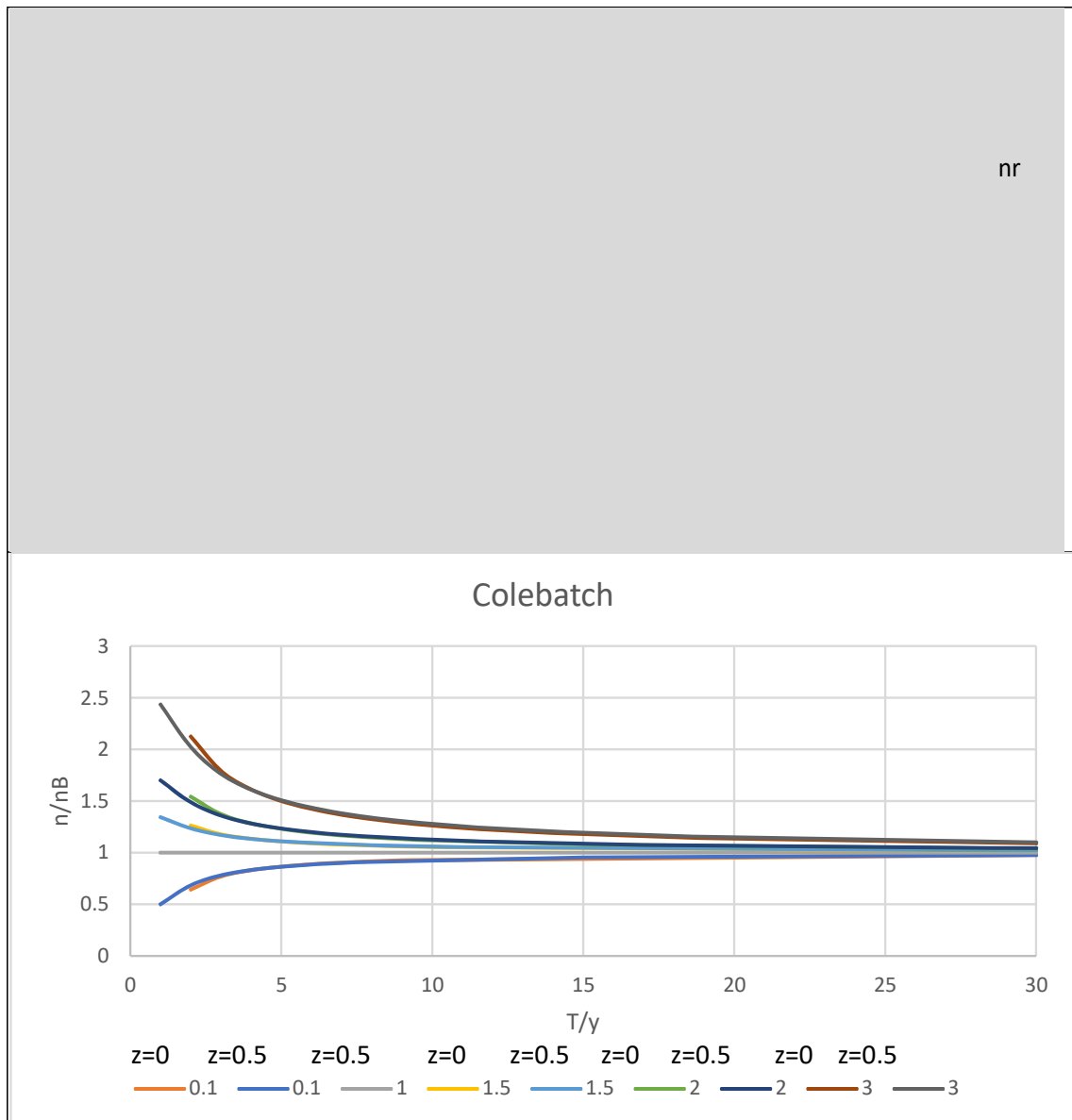


圖 4-16 不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化(Colebatch)

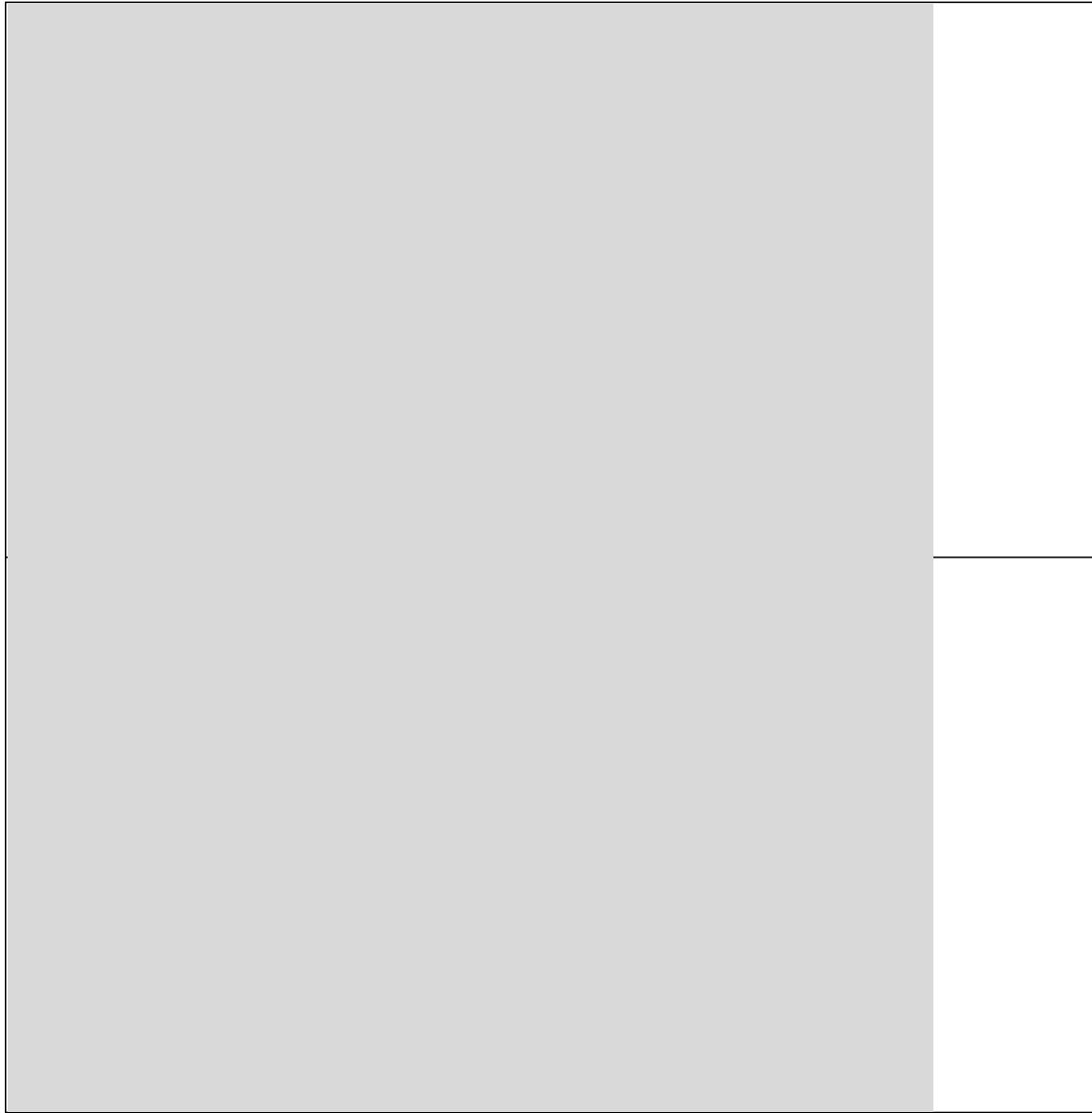


圖 4-17 三模式於不同寬深比之複合式粗糙係數變化

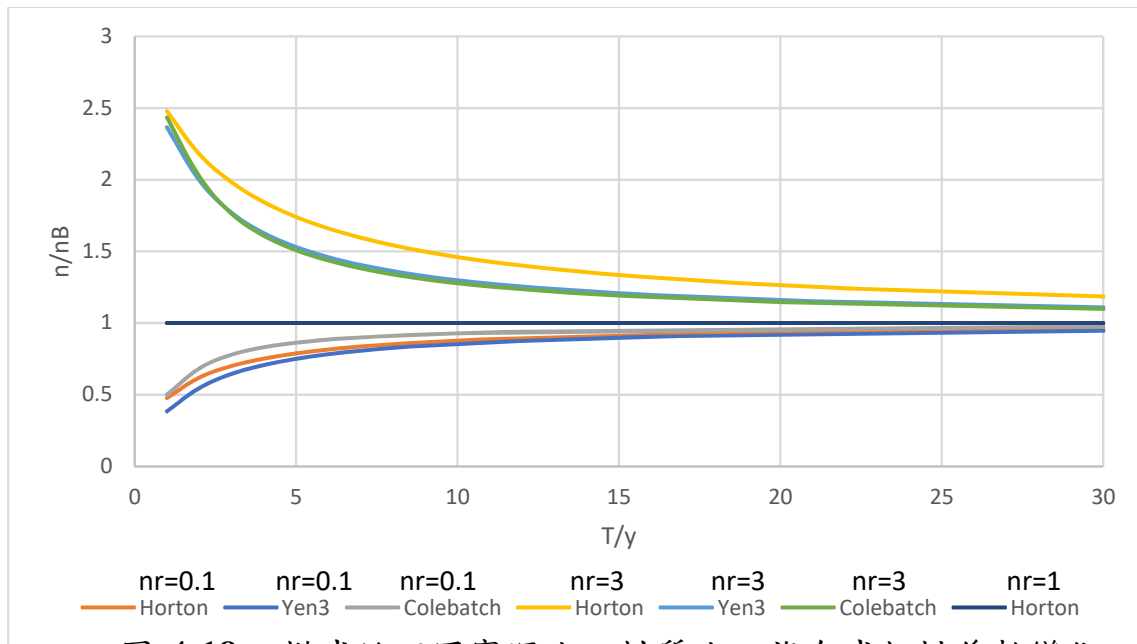


圖 4-18 三模式於不同寬深比、材質比之複合式粗糙係數變化

第四節 複合式粗糙係數修正

為了瞭解高估或低估粗糙係數值對水理暨工程設計影響，本計畫選取 111 年和 112 年度優良農建得獎作品中，粗糙係數較低或較高者進行分析檢討。包含長興里 4 鄰喜龍農路旁野溪整治改善工程($n=0.017$)；埔里區 11~12 林班坑溝第三期整治工程($n=0.022$)；出火橋下游野溪整治三期工程($n=0.025$)；六溪里石廟旁野溪整治工程($n=0.026$)，以及海尾溪支流下游段坑溝災害整治工程 ($n=0.083$)等共 5 案例。由於海尾溪並未於簡報資料提列其 n 值，本計畫以其簡報資料參數推算其粗糙係數值，相關之水理參數如表 4-23 所示。

表 4-23 農業部五件優良農建工程之相關水理參數

優良農建工程名稱	位置	X 座標	Y 座標	B(m)	H(m)	z	T/y	S
長興里 4 鄰喜龍農路旁野溪整治改善工程	桃園市復興區	277107	2742210	4.50	0.6	0.30	8.10	0.0317
埔里區 11~12 林班坑溝第三期整治工程	臺中市霧峰區	226948	2658910	18.00	0.4	0.30	45.60	0.0458
出火橋下游野溪整治三期工程	屏東縣恆春鎮	227144	2433951	9.60	1.9	0.70	6.45	0.009
六溪里石廟旁野溪整治工程	臺南市白河區	193070	2579798	30.00	3.5	0.50	9.57	0.006
海尾溪支流下游段坑溝災害整治工程	新北市三芝區	299901	2792763	3.80	1.8	0.30	2.71	0.0475

資料來源：農業部/獎項專區/優良農業建設工程獎網站

以 Horton、Yen 和 Colebatch 三模式計算複合式粗糙係數得到表 4-24。

表 4-24 模式計算複合式粗糙係數成果表

	n _B	n _r	T/y	z	n
Horton	0.017	2.06	8.1	0.3	0.022
	0.022	1.59	18.24	0.3	0.024
	0.025	1.4	6.45	0.7	0.028
	0.026	1.35	9.57	0.5	0.028
	0.083	0.2	2.71	0.3	0.056
Yen	0.017	2.06	8.1	0.3	0.027
	0.022	1.59	18.24	0.3	0.028
	0.025	1.4	6.45	0.7	0.035
	0.026	1.35	9.57	0.5	0.035
	0.083	0.2	2.71	0.3	0.063
Colebatch	0.017	2.06	8.1	0.3	0.02
	0.022	1.59	18.24	0.3	0.023
	0.025	1.4	6.45	0.7	0.027
	0.026	1.35	9.57	0.5	0.027
	0.083	0.2	2.71	0.3	0.059

採用差距較大之曼寧粗糙係數值重新檢算流量，如表 4-25 所示。

表 4-25 原粗糙係數與複合式粗糙係數對照

原 n 值	原 Q (cms)	複合式 n 值	修正 Q (cms)	Q ₅₀ (cms)
0.017	18.231	0.027	11.479	15.290
0.022	37.300	0.028	29.307	17.670
0.025	101.352	0.035	72.395	99.980
0.026	679.113	0.035	504.484	515.500
0.083	20.969	0.056	31.079	19.030

資料來源：農業部/獎項專區/優良農業建設工程獎網站

除了海尾溪之 $n_y = \eta_w/n_B < 1$ 以外，其餘之 n_y 都大於 1。自表 4-25 中可知，以原先採用之曼寧粗糙係數值所計算求得之設計流量都大於 Q_{50} ；經

過複合式粗糙係數值重新檢算後，僅有第2、5案檢算合格；其餘修正後之設計流量都無法通過檢算。五件模擬案例照片取自農業部/獎項專區/優良農業建設工程獎網站之得獎簡報，如圖 4-19 所示。



a. 長興里 4 鄰喜龍農路旁野溪整治改善工程



b. 埔里區 11~12 林班坑溝第三期整治工程



c. 出火橋下游野溪整治三期工程



d. 六溪里石廟旁野溪整治工程



e. 海尾溪支流下游段坑溝災害整治工程

圖 4-19 模擬案例照片

資料來源：農業部/獎項專區/優良農業建設工程獎網站

第五節 研發複合式護岸粗糙係數表

目前水土保持手冊除了列舉卵石底，乾砌塊石邊壁渠道之曼寧粗糙係數外，其餘護岸材質如造型模板、生態槽、箱籠等複合式粗糙係數則有待補充。另外，所列舉之粗糙係數大都為一般河流，對於底床質為塊石、礫石或砂質、泥質野溪之粗糙係數則沒有說明。

由於河床質種類和護岸材質類型所互相搭配而成之護岸型式繁多，很難將其複合式粗糙係數值全部列表以供查詢。因此，本計畫初步以 Horton、Yen3 和 Colebatch 等 3 個模式模擬天然河道和山區河流在粗護岸材質($n_w = 0.035$)和細護岸材質($n_w = 0.017$)情況下之複合式粗糙係數，並製表如表 4-26、表 4-27、表 4-28 與表 4-29 所示。

表 4-26 粗護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=10$)

二、天然河道	nB	T/y=10		nB	T/y=10	
(一)小河流(洪水位時水面寬小於30公尺)	n 值	複合式 n 值		n 值	複合式 n 值	
1.平原河流	最小值	max	min	最大值	max	min
(1)清潔，順直，無淺灘和深潭	0.025	0.027	0.026	0.033	0.033	0.033
(2)同上，多石及雜草	0.03	0.031	0.031	0.04	0.04	0.039
(3)清潔，彎曲，有深潭和淺灘	0.033	0.033	0.033	0.045	0.044	0.043
(4)同上，但有些雜草和石塊	0.035	0.035	0.035	0.05	0.049	0.047
(5)同上，水深較淺，河底坡度多變，平面上回流區較多	0.04	0.040	0.039	0.055	0.053	0.051
(6)與(4)相同，但有較多石塊	0.045	0.044	0.043	0.06	0.058	0.055
(7)流動很慢的河段，多草，有深潭	0.05	0.049	0.047	0.08	0.076	0.072
(8)多雜草的河段，河多深潭，及有林木、灌木叢	0.075	0.071	0.068	0.15	0.14	0.130
2.山區河流(河槽無草樹，河岸較陡，岸坡樹叢過洪時淹沒)						
(1)河底：礫石、卵石間有孤石	0.03	0.031	0.031	0.05	0.049	0.047
(2)河底：卵石和大孤石	0.04	0.040	0.039	0.07	0.067	0.064

表 4-27 粗護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=30$)

二、天然河道	nB	T/y=30		nB	T/y=30	
(一)小河流(洪水位時水面寬小於 30 公尺)	n 值	複合式 n 值		n 值	複合式 n 值	
1.平原河流	最小值	max	min	最大值	max	min
(1)清潔，順直，無淺灘和深潭	0.025	0.026	0.025	0.033	0.033	0.033
(2)同上，多石及雜草	0.03	0.030	0.03	0.04	0.04	0.04
(3)清潔，彎曲，有深潭和淺灘	0.033	0.033	0.033	0.045	0.045	0.044
(4)同上，但有些雜草和石塊	0.035	0.035	0.035	0.05	0.049	0.049
(5)同上，水深較淺，河底坡度多變，平面上回流區較多	0.04	0.04	0.04	0.055	0.054	0.054
(6)與(4)相同，但有較多石塊	0.045	0.045	0.044	0.06	0.059	0.058
(7)流動很慢的河段，多草，有深潭	0.05	0.049	0.049	0.08	0.079	0.077
(8)多雜草的河段，河多深潭，及有林木、灌木叢	0.075	0.074	0.073	0.15	0.147	0.143
2.山區河流(河槽無草樹，河岸較陡，岸坡樹叢過洪時淹沒)						
(1)河底：礫石、卵石間有孤石	0.03	0.030	0.030	0.05	0.049	0.049
(2)河底：卵石和大孤石	0.04	0.040	0.040	0.07	0.069	0.068

表 4-28 細護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=10$)

二、天然河道	nB	T/y=10		nB	T/y=10	
(一)小河流(洪水位時水面寬小於 30 公尺)	n 值	複合式 n 值		n 值	複合式 n 值	
1.平原河流	最小值	max	min	最大值	max	min
(1)清潔，順直，無淺灘和深潭	0.025	0.024	0.024	0.033	0.032	0.030
(2)同上，多石及雜草	0.03	0.029	0.028	0.04	0.038	0.036
(3)清潔，彎曲，有深潭和淺灘	0.033	0.032	0.03	0.045	0.043	0.040
(4)同上，但有些雜草和石塊	0.035	0.033	0.032	0.05	0.047	0.044
(5)同上，水深較淺，河底坡度多變，平面上回流區較多	0.04	0.038	0.036	0.055	0.052	0.048
(6)與(4)相同，但有較多石塊	0.045	0.043	0.04	0.06	0.056	0.052
(7)流動很慢的河段，多草，有深潭	0.05	0.047	0.044	0.08	0.075	0.069
(8)多雜草的河段，河多深潭，及有林木、灌木叢	0.075	0.070	0.065	0.15	0.14	0.127
2.山區河流(河槽無草樹，河岸較陡，岸坡樹叢過洪時淹沒)						
(1)河底：礫石、卵石間有孤石	0.03	0.029	0.028	0.05	0.047	0.044
(2)河底：卵石和大孤石	0.04	0.038	0.036	0.07	0.066	0.061

表 4-29 細護岸材質之複合式粗糙係數表($T/y=30$)

二、天然河道	nB	T/y=30		nB	T/y=30	
(一)小河流(洪水位時水面寬小於 30 公尺)	n 值	複合式 n 值		n 值	複合式 n 值	
1.平原河流	最小值	max	min	最大值	max	min
(1)清潔，順直，無淺灘和深潭	0.025	0.025	0.024	0.033	0.032	0.032
(2)同上，多石及雜草	0.03	0.03	0.029	0.04	0.039	0.039
(3)清潔，彎曲，有深潭和淺灘	0.033	0.032	0.032	0.045	0.044	0.043
(4)同上，但有些雜草和石塊	0.035	0.034	0.034	0.05	0.049	0.048
(5)同上，水深較淺，河底坡度多變，平面上回流區較多	0.04	0.039	0.039	0.055	0.054	0.053
(6)與(4)相同，但有較多石塊	0.045	0.044	0.043	0.06	0.059	0.057
(7)流動很慢的河段，多草，有深潭	0.05	0.049	0.048	0.08	0.078	0.076
(8)多雜草的河段，河多深潭，及有林木、灌木叢	0.075	0.073	0.071	0.15	0.146	0.142
2.山區河流(河槽無草樹，河岸較陡，岸坡樹叢過洪時淹沒)						
(1)河底：礫石、卵石間有孤石	0.03	0.03	0.029	0.05	0.049	0.048
(2)河底：卵石和大孤石	0.04	0.039	0.039	0.07	0.068	0.067

目前程式設計已經完成，未來經過農村水保署經行政程序核可後可以改寫為較方便使用之程式。

天然河道和山區河流在粗護岸材質($n_w = 0.035$)和細護岸材質($n_w = 0.017$)情況下之複合式粗糙係數對底床粗糙係數關係圖如圖 4-20、圖 4-21、圖 4-22 和圖 4-23 所示。

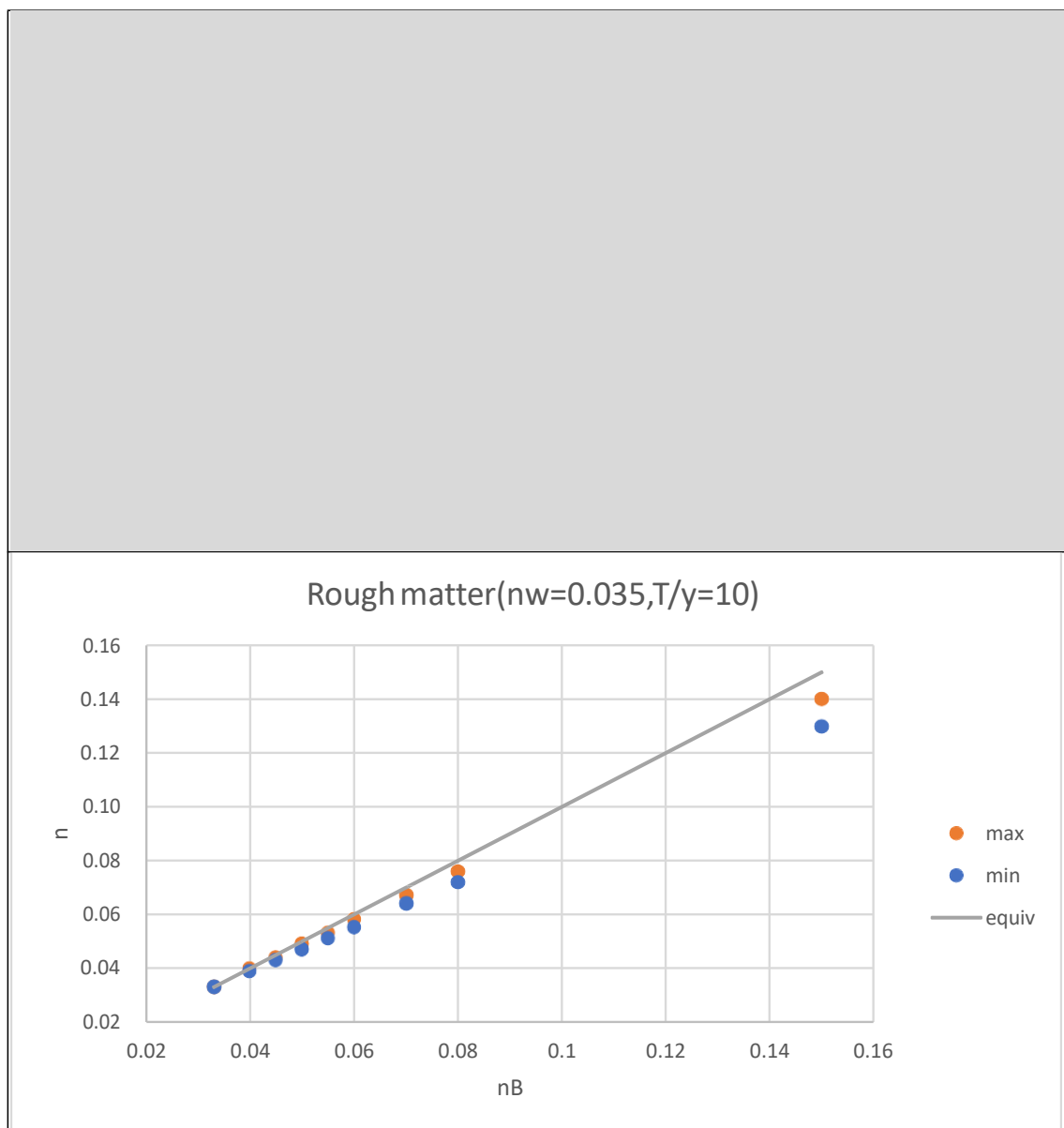


圖 4-20 粗護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/\gamma=10$)

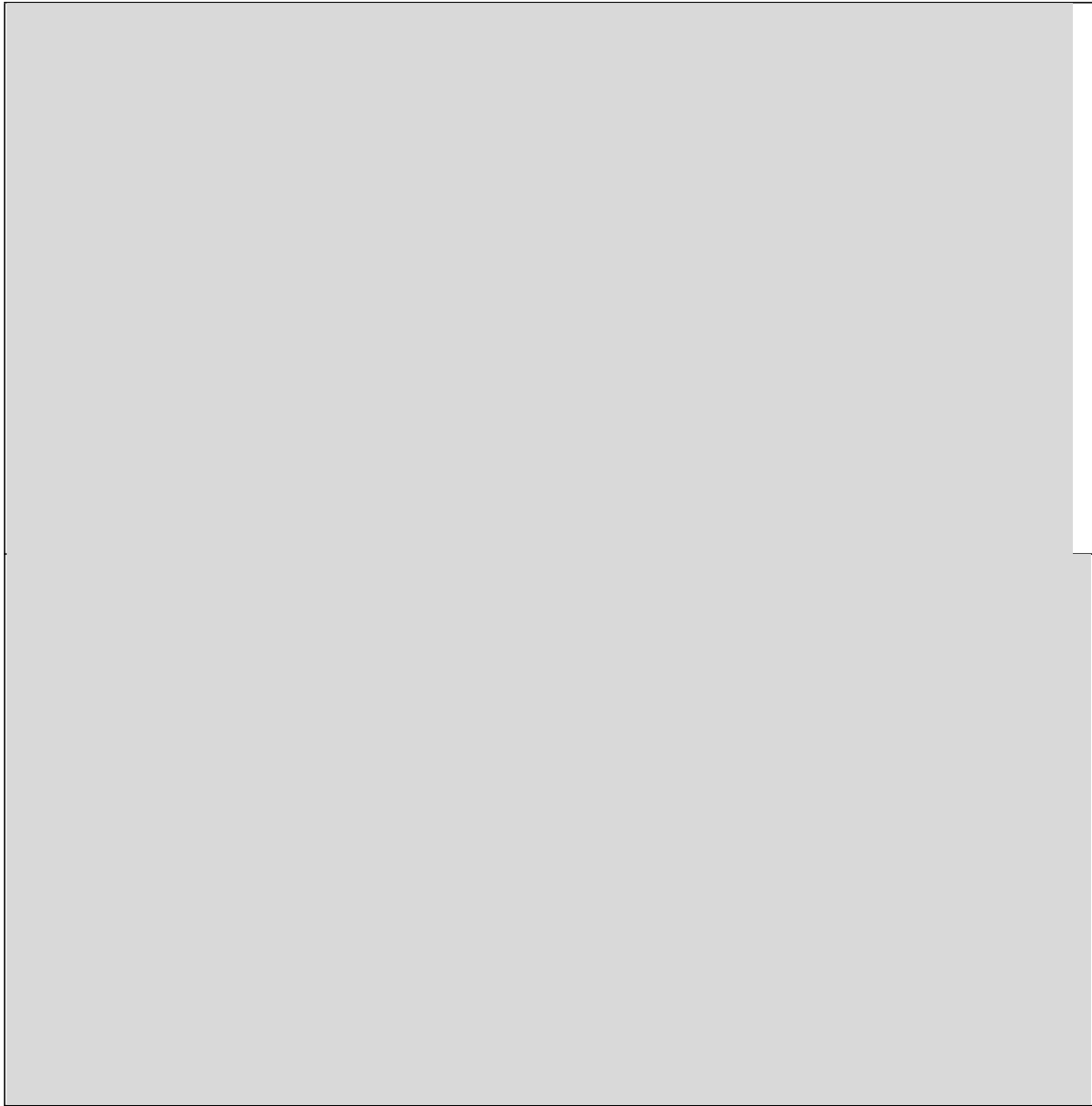


圖 4-21 細護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=10$)

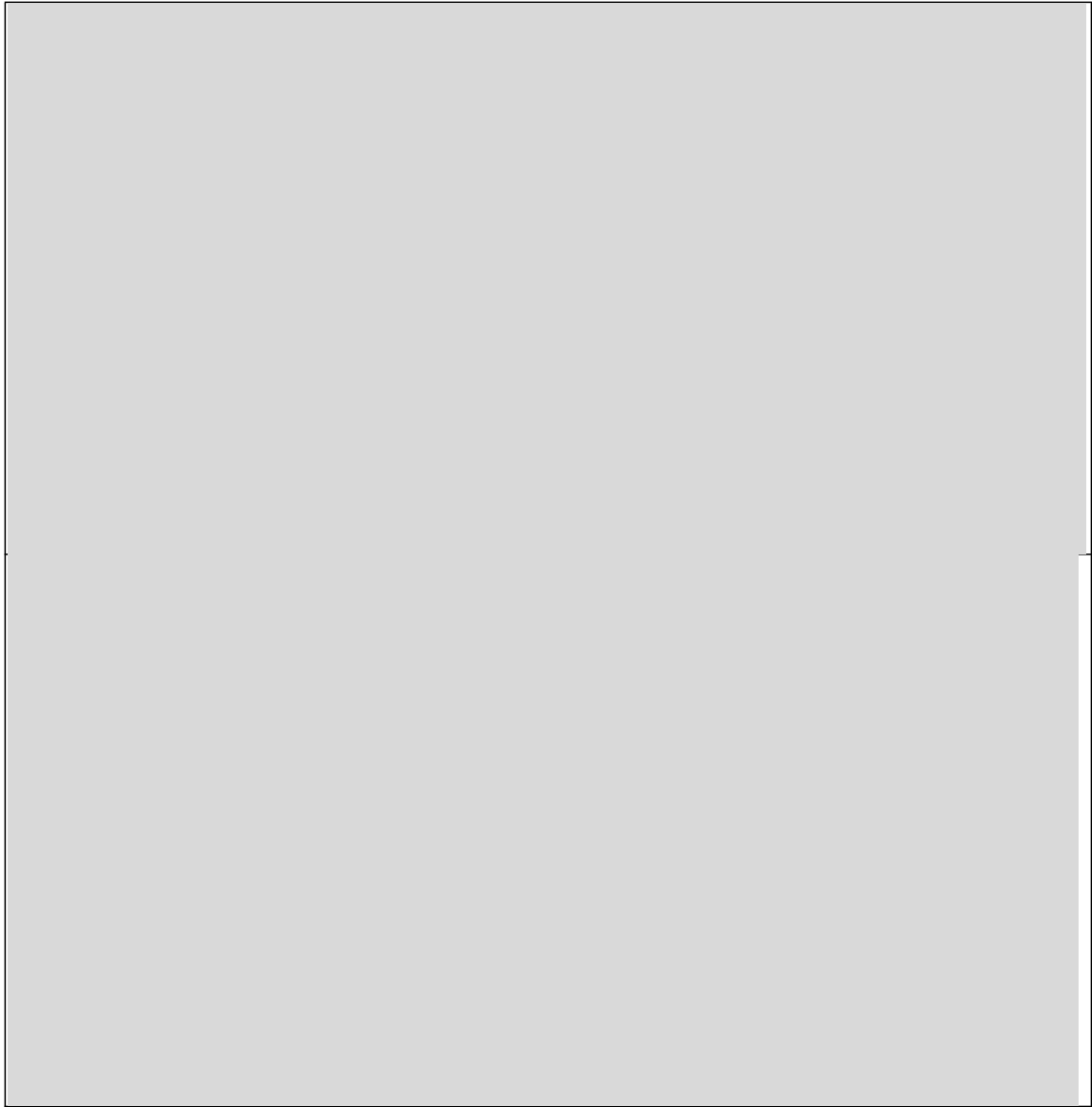


圖 4-22 粗護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=30$)

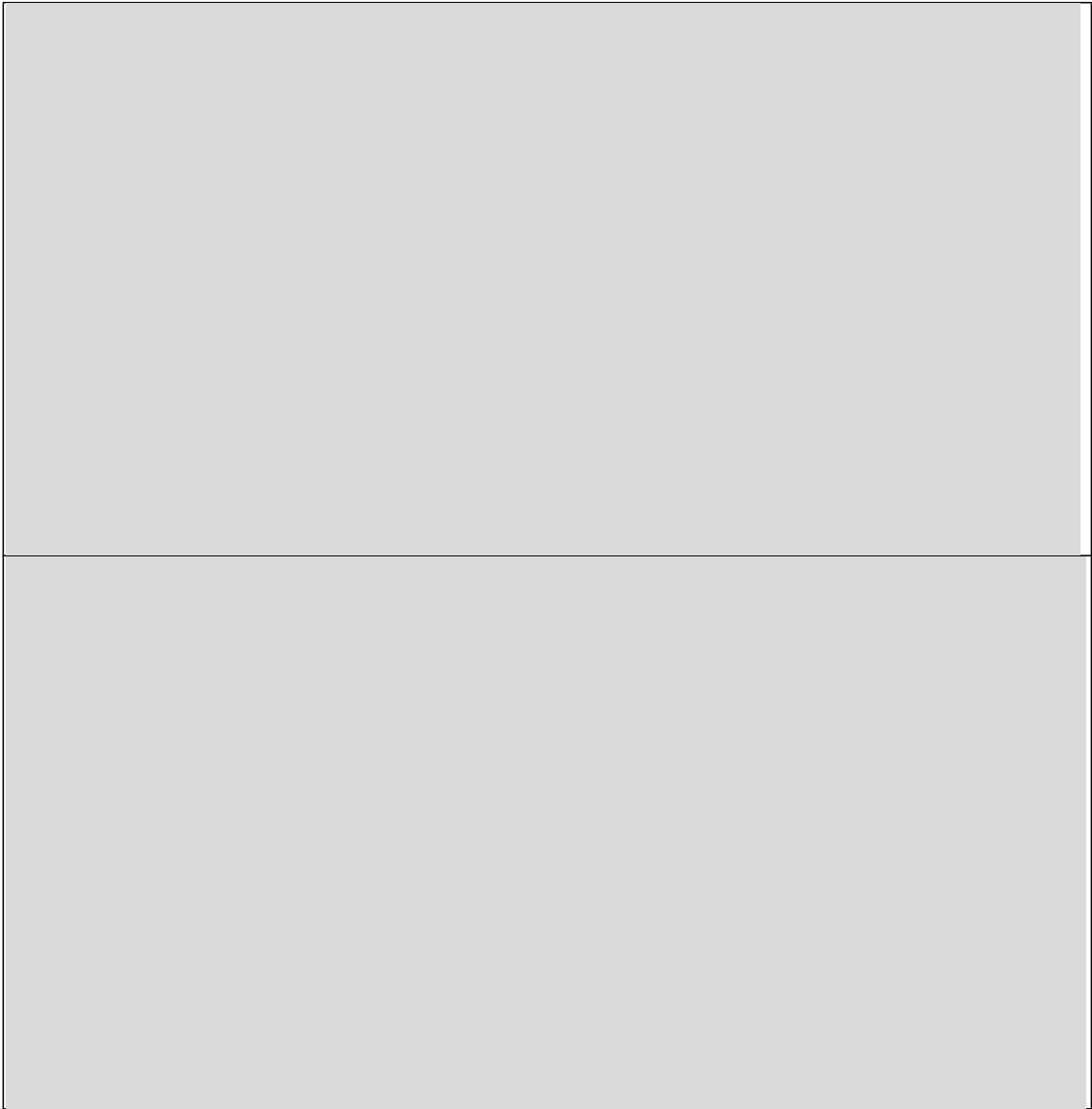


圖 4-23 細護岸材質複合式粗糙係數關係圖($T/y=30$)

第六節 生態水深之低水流路寬度設計建議

一、生態水深

Tennant (1976)綜合 3 個州，11 條河川自 1964~1974 年間 38 場流量，58 種斷面，長 196 英里資料，得到對魚類、野生動物和休閒，以及相關環境資源之良好流量為平均流量之 20% (10 月~3 月) 與 40% (4 月~9 月)。生態基流量則為平均流量之 10%，生態基流量之水面可以覆蓋 60%底床；平均水深為 1 英尺(30.48 釐米)和平均流速 0.75 英尺/秒 (0.23 米/秒)。亦即維護河川生態系統穩定與平衡最小流量，即該河川之生態基流量，平均水深 30 釐米，流速每秒 0.23 米是大多數河川生物生存之最低需求。農業部生物多樣性研究所則建議生態水池水深以不超過 80 釐米為原則，且應有 10~60 釐米之深淺變化。

對於汛期和非汛期水位變化大之河川，或是半乾旱野溪，一般建議採用複式斷面設計以營造足夠之生態水深。最近五年國外之學者專家專注於複式斷面之複合式粗糙係數研究。如 Pradhan 等 (2020)探討複式斷面介面之動量傳輸係數。Liu 等 (2024)以數值模擬探討複式即變斷面之非穩定流即變交換 (hyporheic exchange)。Pradhan 等 (2025)以動量傳輸理論配合試驗成果推導複式斷面之複合式粗糙係數。另外，Sun 等 (2023)探討含砂排水管複合式粗糙係數之變化趨勢。

二、複式斷面流量計算

為了避免枯水期間河床乾涸，或河床僅有伏流水，可以採用之生態工程規劃設計方法應該不少，設計複式斷面讓寬度較小之深槽維持生態水深 為其中一種方式。圖 4-24 為複式斷面示意圖。

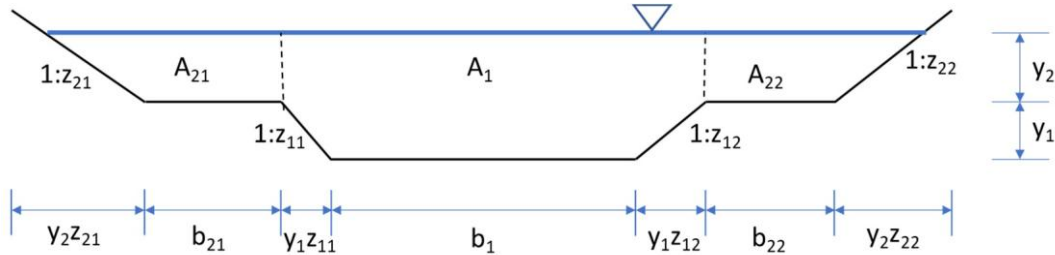


圖 4-24 複式斷面示意圖 不同邊坡坡度以及不同糙度表面之複式斷面流量計算步驟如下：

(一) 計算全部斷面積：

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 0.5 \times \gamma_1 \times 2b_1 + \gamma_1 z_{11} + \gamma_{12} + \gamma_2 \times b_1 + \gamma_1 z_{11} + \gamma_{12} \\
 A_{21} &= 0.5 \times \gamma_2 \times 2b_{21} + \gamma_2 z_{21} \\
 A_{22} &= 0.5 \times \gamma_2 \times 2b_{22} + \gamma_2 z_{22} \\
 A &= \gamma_1 + \gamma_{21} + \gamma_{22} \\
 &= 0.5 \times \gamma_1 \times 2b_1 + \gamma_1 z_{11} + \gamma_{12} + \gamma_2 \times b_1 + \gamma_1 z_{11} + \gamma_{12} + 0.5 \times \gamma_2 \\
 &\quad \times 2b_{21} + \gamma_2 z_{21} + 2b_{22} + \gamma_2 z_{22}
 \end{aligned} \tag{4-85}$$

(二) 計算全部濕周長

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 &= \gamma_1 + \gamma_1 \left(\frac{1}{1 + \gamma_{11}} + \frac{1}{1 + \gamma_{12}} \right) \\
 \gamma_{21} &= \gamma_{21} + \gamma_2 \frac{1}{1 + \gamma_{21}^2} \\
 \gamma_{22} &= \gamma_{22} + \gamma_2 \frac{1}{1 + \gamma_{22}^2} \\
 \gamma_{\text{總}} &= \gamma_1 + \gamma_{21} + \gamma_{22}
 \end{aligned}$$

$$= \sqrt[n_1]{n_1} + \sqrt[n_{21}]{n_{21}} + \sqrt[n_{22}]{n_{22}} + y_1 \left(\sqrt[n_{11}]{n_{11}} + \sqrt[n_{12}]{n_{12}} \right) + y_2 \left(\sqrt[n_{21}]{n_{21}} + \sqrt[n_{22}]{n_{22}} \right) \quad (4-86)$$

(三) 深槽：

1. 深槽斷面積：

$$A_1 = 0.5 \times \sqrt[n_1]{n_1} \times [2b_1 + \sqrt[n_1]{n_1}(z_{11} + \sqrt[n_{12}]{n_{12}})] + \sqrt[n_2]{n_2} \times [b_1 + \sqrt[n_1]{n_1}(z_{11} + \sqrt[n_{12}]{n_{12}})] \quad (4-87)$$

2. 深槽濕周長：

$$\sqrt[n_1]{n_1} = \sqrt[n_1]{n_1} \left(\sqrt[n_{11}]{n_{11}} + \sqrt[n_{12}]{n_{12}} \right) \quad (4-88)$$

(四) 計算複合式粗糙係數

如果水力半徑小於 4.57 公尺 (15 呎)，適用 Cowan (1956) 模式：

$$n = (n_0 + \sqrt[n_1]{n_1} + \sqrt[n_2]{n_2} + \sqrt[n_3]{n_3} + \sqrt[n_4]{n_4}) m_5 \quad (4-89)$$

或是 HEC-RAS 採用之 Horton 模式(1933)：

$$\sqrt[n]{n} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt[n_i]{n_i}}{P} \quad (4-90)$$

(五) 依據曼寧模式分別計算深槽與河灘地之複合式粗糙係數，繼而計算個別之流速與流量。

(六) 將深槽與河灘地流量加總，即為複式斷面通水流量。

三、研究樣區之生態河槽設計

猴猴坑屬於清潔，順直，無淺灘和深潭之小河流 ($n_B=0.025$)，兩岸為造型模板鋼筋混凝土護岸($n_w=0.035$)。福德坑觀測河床鋪設大塊石，兩岸邊坡乾砌修整過之大塊石，其粗糙係數 n_B 與 n_w 分別為 0.025 與 0.017。打鐵坑屬於清潔，順直，無淺灘和深潭之小河流 ($n_B = 0.025$)，兩岸為生態槽混搭造型模板護岸($n_w=0.035$)。本計畫研究樣區之基本資料如表 4-30 所示。

如果以一日降雨延時重現期 2 年洪峰流量視為枯水期之代表流量，演算成果如所示。當猴猴坑之一日降雨延時重現期 2 年洪峰流量為 8.59 cms 時，設計水深僅有 0.60m；福德坑則是 23.92cms/0.20m；打鐵坑為 14.06cms/0.33m。無法滿足理想生態水深 0.8m 之條件。在考慮枯水期流量、河床滲漏量和生態基流量等條件下，深槽設計初步以高度 0.8 米，兩側邊坡豎橫比與主河槽相同。河灘地粗糙係數都假設為 0.025，深槽邊坡粗糙係數都假設為 0.017，主河槽邊坡粗糙係數：猴猴坑與打鐵坑一樣，都為 0.035；福德坑因為是修整過之乾砌石，粗糙係數較小，為 0.017。研究樣區複式斷面之各個輸入參數如表 4-31 所示。

表 4-30 研究樣區基本資料

	底寬	頂寬	豎橫比	護岸高度	Q_2	y(m)	護岸材質
猴猴坑	3.6	4.2	0.14	2.2	8.59	0.60	造型模板
福德坑	32	47	2.31	3.3	23.92	0.20	乾砌石
打鐵坑	18.4	20.8	0.58	2.1	14.06	0.33	生態槽混搭 造型模板

表 4-31 生態水深設計之輸入參數

項目	b_1	b_{21}	b_{22}	z_{11}	z_{12}	z_{21}	z_{22}	nb_1	nb_{21}	nb_{22}	nz_{11}	nz_{12}	nz_{21}	nz_{22}
猴猴坑	1	0.9	0.9	0.14	0.14	0.14	0.14	0.025	0.025	0.025	0.017	0.017	0.035	0.035
福德坑	1.9	15	15	2.31	2.31	2.31	2.31	0.025	0.025	0.025	0.017	0.017	0.017	0.017
打鐵坑	2	7	6.35	0.575	0.575	0.575	0.575	0.025	0.025	0.025	0.017	0.017	0.035	0.035

以 Horton 模式計算複合式粗糙係數之影響所致：猴猴坑之深槽與河灘粗糙係數值由 0.025、0.025 成為 0.02、0.028；福德坑則是由 0.025、0.025 成為 0.02、0.025；打鐵坑由 0.025、0.025 成為 0.021、0.025。計算成果如表 4-32 所示。不僅深槽滿足 0.8m 之條件，猴猴坑之河灘水深為 0.32m；福德坑為 0.06m；打鐵坑為 0.17m。深槽上方之主河槽水深有：猴猴坑 1.12m；福德坑 0.86m；打鐵坑 0.97m。

表 4-32 生態水深計算成果

樣區	深槽 n 值	河灘 n 值	深槽底 寬(m)	河灘水深 (m)	深槽流量 (cms)	河灘流量 (cms)	全流量 (cms)
猴猴坑	0.02	0.028	1.0	0.32	7.086	1.502	8.587
福德坑	0.02	0.025	1.9	0.06	22.702	1.209	23.912
打鐵坑	0.021	0.025	2.0	0.17	10.586	3.468	14.053

計畫所研擬之公式都必須經由農村水保署之行政程序審議、修正及認可後才能推廣使用。

第七節 辦理 1 場次座談會

一、計畫緣起及目的

曼寧粗糙係數為野溪治理或整流工程規劃設計之關鍵參數，對於大塊石河床而言，新創護岸之粗糙係數可能與大塊石河床粗糙係數相近。對於細礫石河床而言，新創護岸之粗糙係數遠大於河床之粗糙係數，如果依舊以河床粗糙係數代表全斷面之粗糙係數計算時，可能會低估設計洪峰水深，導致護岸設計高度不足，而有溢淹之可能；反之，逕自以新創護岸之粗糙係數代表細礫石河床之全斷面粗糙係數，又可能高估設計洪峰水深，除提高工程經費外，也會使加高之護岸高度成為水、陸域動物通道之額外障礙。

由於河流之寬深比越大，邊坡粗糙度之影響越小。野溪之寬深比較小，更顯得邊坡或護岸粗糙度對於複合式粗糙係數之影響更大。目前經常使用之曼寧粗糙係數表雖然也包括不同粗糙度之河床與邊坡所組成之複合式粗糙係數，這類定性描述之參考數據並未包含人工或新創護岸材質，以及寬深比之影響，導致技師在規劃設計時對於曼寧粗糙係數之選擇產生極大之困擾。

另外，為了讓全年有水之野溪於枯水期之水域生態通道更為順暢，本計畫提出能夠維持最小生態水深之複式斷面生態河槽寬度設計方案，提供討論。

有關複合式護岸粗糙係數參數值，在實務應用上尚需更簡單實用之表格及設計方法提供給技師設計使用，透過本計畫提出相關建議表單，在學界、業界、公務機關與技師討論後，再提供設計規劃參考使用。

二、參加對象

農村水保署暨各分署同仁及各分署委辦團隊。

三、座談會時間及地點

(一) 時間：114 年 10 月 15 日 (星期三) 09:00~12:00

(二) 地點：集思台中新烏日會議中心 3 樓 巴本廳 (臺中市烏日區高鐵東一路 26 號)

四、課程內容及講師介紹

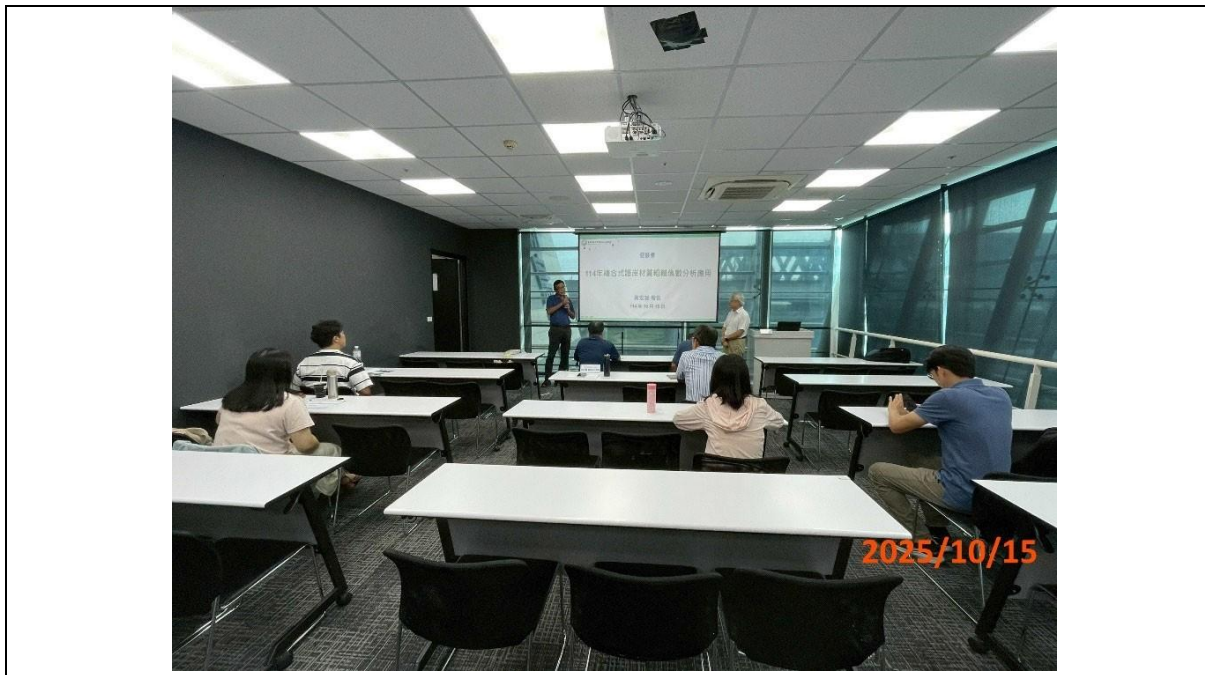
相關課程內容如表 4-33 所示。

表 4-33 座談會課程內容

日期	民國 114 年 10 月 15 日		
課程 規劃	時間	內容	講者
	08:40~09:00	報到	
	09:00~09:10	長官致詞	
	09:10~10:00	增修「不同邊坡河流的曼寧粗糙係數 n 值表」	黃宏斌教授
	10:00~10:10	休息時間	
	10:10~11:00	複式斷面之生態河槽寬度設計	黃宏斌教授
	11:00~12:00	綜合討論	
	12:00~	座談會結束	

五、座談會照片

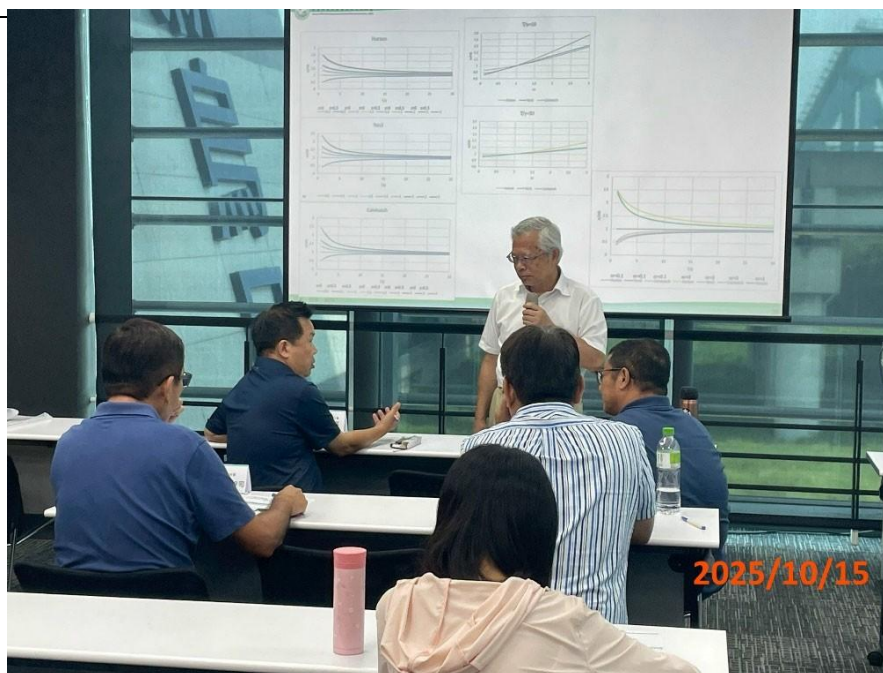
座談會相關照片如圖 4-25 所示。



洪政義簡任正工程司致詞



上課一景



鄧鳳儀理事長發問



座談會參與人員合照
圖 4-25 座談會相關照片

六、參與心得

(一) 陳智誠理事長

1. 建議本研究案分年度進行，最後產出的成果能供設計端使用，如能以電子化程式提供採用更佳。
2. 單、複式斷面目前採用的推估公式用 Horton 公式，建議說明原因及適用範圍。

(二) 謝孟良理事長

1. 目前工程設計針對河道曼寧粗糙係數之選用僅提供各種不同材質之選用係數值供參。惟複合式護岸如實際斷面之底面及壁面材質不同，且應用在複式斷面上，則不同水位高度之流況將受粗糙係數值影響甚鉅。
2. 本次座談會提供的計算方式經過各種學理公式及現場測量驗證，均可證明實際應用之可靠性，將可提供工程設計針對不同斷面材質及尺寸型式變化下更接近實際流況之曼寧粗糙係數選用值，可使設計成果真正能達到保護目標，避免過度設計增加工程經費或設計安全高度不足，降低安全保障之情形發生。
3. 建議後續可持續推動應用成果，例如建立網頁版服務，提供具有公信力之設計參考曼寧粗糙係數選用值。

(三) 鄧鳳儀理事長

1. 河道粗糙係數決定影響到後續河道中水位演算至關重大，粗糙係數值取太小，則演算出之水位太低，則後續設計之護岸可能不足，反之則水位太高，後續設計之護岸太高又有設計過量之虞，因此本案可以提供很好的參考。
2. 一般性河道粗糙係數決定常引用水土保持手冊之建議數值，但

水土保持手冊之建議數值範圍值太大，如何取捨常決定工程設計之失敗與否，如何將河道粗糙係數決定更貼近河道之真實數值，是本案最大貢獻，建議對河道材質做更明確的敘述及說明，可以讓設計者有更好更明確的引用。

3. 對於河道或護岸屬複合式護岸材質或左、右岸不同材質護岸，建議可以提供如何在不同材質護岸時如何選擇河道粗糙係數值建議或如何加權之建議。

第五章 結論與建議

第一節 結論

經過文獻回顧、現地水文觀測，以及重新整理模式，本計畫得到以下結論和建議：

本計畫就 5 年來所蒐集之水文資料分析彙整，得到曼寧粗糙係數、能量損失、達西摩擦因子和福祿數對雷諾數之關係曲線。

將所蒐集之複合式粗糙係數模式分為濕周、濕周與水力半徑，以及面積參數群，分別探討並提出相關模式估算複合式粗糙係數之差異。

當邊坡粗糙係數大於河床質粗糙係數時， n/n_B 會隨寬深比由大轉小，最後趨近於 1.0。相反地，當邊坡粗糙係數小於河床質粗糙係數時， n/n_B 會隨寬深比由小轉大，最後趨近於 1.0。當寬深比大於 30 時，複合式粗糙係數與河床質粗糙係數相近；當寬深比小於 30，甚至小於 10 時，複合式粗糙係數與河床質粗糙係數之關係需要藉由模式估算。

第二節 建議

建議所研發之複合式護岸粗糙係數簡易表，未來有機會進行實地驗證，以確保其在設計中之可靠性。此外，如果能夠從事不同材質在實際應用中之性能測試數據，特別是抗沖擊力和耐久性表現，將會對於水土保持工程技術更有幫助。

由於造型模板和生態槽護岸之現場使用越來越多，建議盡速制訂相關施工規範及驗收標準，並明確卡樺結構力學參數，以提升施工效率與安全性。除了創新設計更多複合式護岸材質外，並加強其在極端氣候條件下之性能測試。

參考文獻

1. 天強有限公司，造型模板網頁，2025.06
2. 王如意、易任，應用水文學，新編上、下冊，新編 16 印，國立編譯館，2017.08
3. 姜國幹，水槽兩壁對於臨界拖曳力之影響，中央水利實驗處研究報告乙種 1 號，1948
4. 桃園市政府水務局，桃園市大溪排水淨化工程，環境部水質淨化現地處理網站，2017.12
5. 黃宏斌，台灣的永續野溪治理工程，第三屆永續發展與綠色科技研討會暨第二屆創新發明、科學、輔導教學研討會論文集，p.3，2019.04
6. 黃宏斌，生態河川治理工程，2019.05
7. 黃宏斌，整流工程設計參考叢書研擬，行政院農業部農村發展及水土保持署研究報告，2020.12
8. 黃宏斌，水土保持工程，第二版，五南圖書出版股份有限公司，2021.10
9. 黃宏斌，李偉哲，陸家樑，不同護岸鋪面材質粗糙係數分析研究，行政院農業部農村發展及水土保持署研究報告，2022.05
10. 黃宏斌，李偉哲，陸家樑，廖國偉，複合式護岸材質粗糙係數之室內外試驗分析，行政院農業部農村發展及水土保持署研究報告，2023.05
11. 黃宏斌，李偉哲，潘宗毅，112 年複合式護岸材質粗糙係數分析應用，行政院農業部農村發展及水土保持署農村水保署研究報告，2024.08
12. 黃宏斌、徐詠秋、陳玟君，護岸材質對粗糙係數影響探討，第二十八屆海峽兩岸水利科技交流研討會論文摘要集，p.15，2024.08
13. 黃宏斌、張欽舜，複合式粗糙係數模式於台灣野溪適用性探討，第二十七屆海峽兩岸水利科技交流研討會論文摘要集，p.96，2023.08
14. 黃瀚柔，台中市筏子溪生態廊道之研究與建構--以中游為例，逢甲大學建築學系碩士論文，2012.02
15. 農業部，111 年度優良農業建設工程獎優等工程名單，2022
16. 農業部，112 年度優良農業建設工程獎優等工程名單，2023
17. 農業部，水土保持技術規範，2023.05
18. 農業部生物多樣性研究所，社區生態水池推廣手冊，2014.09
19. 農業部農村發展及水土保持署，水土保持手冊，2017.12
20. 農業部農村發展及水土保持署，水土保持工程設計參考圖冊，2019.12
21. 農業部農村發展及水土保持署，水土保持工程施工規範，2021.03
22. Arcement, G.J., Jr. & V.R. Schneider, Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, Water-Supply Paper 2339, USGS, 1989
23. Djajadi, R., Comparative Study of Equivalent Manning Roughness Coefficient for Channel with Composite Roughness, Civil Engineering Dimensions, 11(2), 113-118, 2009.09
24. Einstein, H.A., Method of Calculating the Hydraulic Radius in A Cross Section with Different Roughness, Trans., Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 107, 575-577, 1942
25. Ferguson, R.I., Roughness Calibration to Improve Flow Predictions in Coarse-Bed Streams, Water Resources Research 57(6), 2021
26. Ikegwuoha, C.D., Investigations of composite roughness coefficient in a river with low

- flow, WIReDSpace, University of the Witwatersrand Johannesburg, 2014.02
27. Jarrett, R.D., Determination of Roughness Coefficients for Streams in Colorado, Water-resources Investigations Report 85-4004, 1985
 28. Karunaratne, K.B.E., Comnputation of Composite Manning's n Factor, ,
 29. Li, Z. & J. Zhang, Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient, Agricultural Water Mangement 49(2001):153-161, 2001
 30. Liu, J. & Y. Xiao, P. Xin, N. Wang, S. Yuan, T. Zhang, C. Li, C. Gualtieri, Hyporheic exchange in a compound channel under unsteady flow: Numerical simulations, Journal of Hydrology 631, 2024.03
 31. Lotter, G.K., Considerations on Hydraulic Design of Channels with Different Roughness of Walls, Trans., All-Union Sci. Res. Inst. Hyd. Engin., Leningrad, U.S.S.R., Vol. 9, 1933
 32. Moore, D., Using Mannings Equation with Natural Streams, NRCS Water Quality and Quantity Technology Development Team, Portland Oregon, 2011.08
 33. Phillips, J.V. & S. Tadayon, Selection of Manning's Roughness Coefficient for Natural and Constructed Vegetated and NonVegetated Channels, and Vegetation Maintenance Plan Guidelines for Vegetated Channels in Central Arizon, Scientific Investigations Report 2006-5108, U.S. Geological Survey Publication, 2007
 34. Pradhan, S. & B. Pradhan, K. Khatua, Experimental investigations and modelling of composite roughness for compound channels, Journal of Hydrology 651, 2025.04
 35. Pradhan, S. & K. Khatua, Momentum transfer coefficients at the adjoining interfaces of a compound channel, Flow Measurement and Instrumentation, 2020.10
 36. Pradhan, S. & K.K. Khatua, Composite Roughness for Rough Compound Channels, River Flow, CRC Press, 2014.08
 37. Soong, T.W. & M.J. Hoffman, Effects of Riparian Tree Management on Flood Conveyance Study of Manning's Roughness in Vegetated Floodplains with an Application on the Embarras River in Illinois, Illinois Department of Natural Resources, 2002
 38. Sun, B. & R. Yang, A. Tong, S. Chen, Z. Li, The changing rules of the composite roughness in drainage pipelines with sediments, Water Supply 23 (3): 975–995, 2023.02
 39. Tennant, D.L., Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources, Fisheries 1(4):6-10, 1976
 40. Tullis, B.P., Investigations of Composite Roughness Coefficient in a River with Low Flow, Chapters 2,5,6,8, NCHRP Report 734, 2012
 41. US Army Corps of Engineers, Methods for Predicting n Values for the Manning Equation, Open Channel Hydraulic Thoery, US Army Corps of Engineers EM 1110-2-1601, 1994
 42. US Army Corps of Engineers, HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, Ver 6.5, 2025.06
 43. Yassin, A.M., Mean Roughness Coefficient in Open Channels with Different Roughness of Bed and Side-Walls, Mitt. aus der Versuchsastalt für Wasserbau und Erdbau, Zurich, Nr.27, pp.90, 1953
 44. Yen, B.C., Open Channel Flow Resistance, J. Hydraulic Engineering, ASCE. 128(1):20-39, 2002