

---

建立台灣適用之集流時間估算方式

**Establish the Applicable Formulas of  
Concentration Time to Taiwan**

**(成果報告書)**

---

執行單位：中興大學水土保持學系

執行期間：112年2月8日至112年12月31日

計畫主持人：陳樹群 特聘教授

共同主持人：邱彥瑜 博士

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 112 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

# 建立台灣適用之集流時間估算方式

## 摘要

由於大多數水土保持開發計畫所涉及的集水區規模都小於 100 公頃，因此常使用簡化的水文演算方法，包括合理化公式和集流時間公式。然而在將這些方法納入標準之前，應對這兩種公式的正確性進行嚴格的評估，特別是具有爭議性的集流時間公式。為此，本計畫進行了理論分析和實驗研究，以確定集流時間公式的基本形式。由簡化聖凡南方程式(de Saint Venant)的運動波理論出發，得到了初步的集流時間公式如下： $t_c = \frac{n^{0.6}L^{0.6}}{I^{0.4}S^{0.3}}$ ；(t<sub>c</sub>:分鐘)。

透過敏感性分析，我們確定了在高降雨強度條件下（25 到 50 年重現期）的集流時間關係式可簡化為： $t_c = \beta \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3}$  並通過 120 場室內實驗的率定，確定了 β 值約為 0.83。本計劃亦召開了專家討論會和業界技師說明會，以進一步討論本計畫結果，及釐清本公式實務上使用之可能性。

**關鍵詞：**集流時間、水土保持計畫、集水區開發

# Establish the Applicable Formulas of Concentration Time to Taiwan

## Abstract

Due to the fact that most watershed areas involved in soil and water conservation development projects are smaller than 100 hectares, simplified hydrological calculations are often employed. These calculations include Rational Formula and the Concentration Time Equation. Therefore, before incorporating these methods into standards, rigorously assess the appropriateness of these two formulas, particularly the Concentration Time Equation, should be done. As a result, this project has undertaken both theoretical analysis and experimental research to determine the fundamental form of the Concentration Time Equation. We have simplified the kinematic wave theory of the Saint Venant equation to derive the initial runoff time equation as follows:  $t_c = \frac{n^{0.6}L^{0.6}}{I^{0.4}S^{0.3}}$ ; ( $t_c$ : min)

Through sensitivity analysis, we have established that under high rainfall intensity conditions (25 to 50-year return periods), the runoff time equation can be further simplified as follows:  $t_c = \beta \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3}$ . After calibrating through 120 indoor experiments, we have determined that the value of  $\beta$  is approximately 0.83. Additionally, this project has convened expert discussion sessions and industry technician briefings to further discuss the project's findings and clarify the practical usage of this equation.

**Keywords: Concentration Time Equation, Soil and Water Conservation Projects, Watershed Development**

# 目次

目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VI
第一章 前言 .....	1
第一節 計畫目的 .....	1-1
第二節 計畫預期成果 .....	1-2
第三節 工作時程訂定 .....	1-2
第二章 集流時間的觀念發展 .....	2-1
第三章 集流時間公式的基本形態 .....	3-1
第一節 從運動波理論推導集流時間公式 .....	3-1
第二節 國內外常見之集流時間公式 .....	3-4
第三節 集流時間應用限制 .....	3-11
第四章 敏感度分析 .....	4-1
第一節 以 Ragan 集流時間公式為例進行敏感度分析 .....	4-1
第二節 以台灣中上游集水區因子評估敏感度 .....	4-3
第三節 以降雨頻率評估降雨強度之敏感度 .....	4-6
第五章 透過實驗數據檢定驗證係數 .....	5-1
第一節 試驗配置與結果 .....	5-1
第二節 集流時間公式解讀 .....	5-8
第三節 試驗結果與其他公式比較 .....	5-10
第四節 試驗結果與水土保持技術規範第 19 條流入時間之建議 流速比較 .....	5-12
第六章 召開國內外相關領域之學者討論會 .....	6-1
第七章 召開技師等專業人士之說明會 .....	7-1

第八章 結論 .....	8-1
附錄一、意見回覆 .....	附-1
參考文獻.....	參-1

## 表次

表 1-1 本計畫工作執行進度表 .....	1-3
表 3-1 AZIZIAN (2019)比較 36 集流時間經驗公式之誤差與評比.....	3-5
表 3-2 集流時間理論公式.....	3-6
表 3-3 集流時間經驗公式.....	3-7
表 4-1 以坡長與坡度均為中位數之集流時間為 $TC^*$ ，與其他分佈之集 流時間之比例關係 .....	4-5
表 4-2 以獨立山測站為例，HORNER 公式計算之降雨強度 .....	4-6
表 5-1 漫地流水槽實驗之水力條件與實驗結果(鋼板).....	5-4
表 5-2 漫地流水槽實驗之水力條件與實驗結果(礫石) .....	5-5
表 5-3 漫地流水槽實驗之水力條件與實驗結果(草地).....	5-6
表 5-4 前人之集流時間公式以 $I = 100 \text{ mmhr}$ 考量之結果 .....	5-11

## 圖次

圖 4-1 運動波集流時間公式參數敏感度圖 .....	4-2
圖 4-2 以 GIS 進行集水區採樣.....	4-3
圖 4-3 以採樣之集水區之坡度與坡長分佈 .....	4-4
圖 4-4 坡長與坡度分別為 $\mu - 2\sigma, \mu, \mu + 2\sigma$ 時集流時間變化 .....	4-5
圖 4-5 坡度分別為 $\mu, \mu \pm 1\sigma, \mu + 2\sigma$ 時集流時間變化.....	4-5
圖 4-6 坡長分別為 $\mu, \mu \pm 1\sigma, \mu + 2\sigma$ 時集流時間變化 .....	4-5
圖 4-7 降雨強度分別為 $\mu, \mu + 1\sigma, \mu + 2\sigma$ 時集流時間變化.....	4-7
圖 5-1 試驗配置.....	5-2
圖 5-2 集流時間估計方式(範例).....	5-3
圖 5-3 各場次試驗結果之 $\beta$ 值分佈 .....	5-7
圖 5-4 試驗結果之 $\beta$ 值率定 .....	5-8
圖 5-5 $\beta=0.83$ 之集流時間關係式.....	5-9
圖 5-6 $\beta=0.83$ 集流時間關係式之小集水區合理範圍分佈 .....	5-10
圖 5-7 其他集流時間公式與本次實驗之比較 .....	5-11
圖 5-8 不同 $\beta$ 值之集流時間關係式之公式圖差異 .....	5-12
圖 5-9 不同 $\beta$ 值之集流時間關係式之計算結果倍數差異 .....	5-12
圖 5-10 (20)式之流速(M/S)在不同曼寧 N 值下計算結果.....	5-14
圖 6-1 學者討論會照片 .....	6-2
圖 6-2 本計畫召開之學者討論會公文紀錄 (2023/11/03) .....	6-4
圖 6-3 本計畫召開之學者討論會照片 (2023/11/03) .....	6-5
圖 7-1 本計畫召開之業界討論會公文紀錄 (2023/11/24) .....	7-2
圖 7-2 本計畫召開之業界討論會公文紀錄(續) (2023/11/24) .....	7-3
圖 7-3 本計畫召開之業界討論會照片 (2023/11/24) .....	7-4

## 第一章 前言

### 第一節 計畫目的

計算小集水區的天然流量，最常使用合理化公式 ( $Q=CiA$ )，然而使用合理化公式的前提是均勻降雨且降雨延時必須大於等於集流時間。集流時間與合理化公式也就成了一體的兩面，缺一不可。合理化公式可以由運動波理論推導而來 (Eagleson, 1970)，屬於理論公式，較無爭議性，只是自然界不會有真實的時空均勻降雨情況，但以規劃設計而言，仍可視為可被接受的假設前提。但集流時間由定義到推演過程，充滿了模糊空間，交雜著許多經驗及理論法則，各有不同的假設條件及見解，也已在各種論壇及期刊上被充分討論 (Singh, 2001; Beven, 2020)。二十世紀初至今，已有至少超過 50 條的集流時間公式發表於學術期刊及專業叢書。台灣更將集流時間公式納入官方法規位階的「水土保持技術規範」第 19 條。但具爭議的是，該規範收錄且建議使用集流公式中唯一沒有文獻出處的芮哈 (Rziha) 公式，更從未討論該公式在理論上的正確性以及適用範圍。由於水土保持開發計畫多數小於 100 ha 的小集水區，故常使用合理化公式與集流時間公式來進行簡易的水文演算，因此在納入規範前，原須針對兩公式的正確性進行嚴格的審視，特別是極具爭議性的集流時間公式。陳樹群 (1999) 曾收集檢視全球的集流時間公式以發展適合台灣的集流時間公式。經漫長資料彙整，發現所有集流時間都能找到原始文獻出處，唯獨 Rziha 公式遍尋不著，最後僅能缺漏該公式的文獻。當時唯一可以得知的線索是該公式係由日本引入的德國公式，最後在台灣進入教學課堂及「水土保持手冊」，廣被學界及實務界使用，並且自 1996 年



起收錄於「水土保持技術規範」。專業技師及審查委員在進行水土保持計畫相關規劃、設計與審查時，對規範內諸多不合時宜的公式曾多有質疑。黃彥碩等人(2021)藉由各國圖書館的古籍資料及跨域網路資料庫尋找答案，試圖揭開謎團；在不同時空背景，運用不同的語文專長，蒐尋德國、奧地利、日本當地圖書期刊文獻過濾彙整，透過網路交換訊息，探索 Rziha 公式的出處，釐清事件始末，將一個不存在的公式回歸其歷史原位。本計畫即以此為前提，從集流時間理論出發，回顧相關文獻，分析小集水區集流時間公式應具有的基本形態。

## 第二節 計畫預期成果

因應全球氣候變遷極端氣候影響，水保技術規範內之集流時間公式已漸不符合需求，因此應由理論及實驗分析集流時間公式應有之基本型態，例如可包含坡度、長度、粗糙度及降雨強度等因子，以提供適用於台灣之集流時間估算方式。

- 一、由理論方程式為基礎，推導集流時間之型態。
- 二、敏感度分析重要參數。
- 三、透過實驗數據檢定驗證係數。
- 四、召開國內外相關領域之學者討論會。
- 五、召開技師等專業人士之說明會。

## 第三節 工作時程訂定

本計畫預定執行進度及實際執行進度如表 1-1 所示。

表 1-1 本計畫工作執行進度表

工作項目	112 年											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
理論分析集流時間應有之型態												
敏感度分析重要參數												
實驗數據檢定驗證係數												
召開國內外相關領域之學者討論會												
召開技師等專業人士之說明會												
期中報告撰寫												
期末報告撰寫												
成果報告撰寫及繳交												
進 度 (%)	8	16	23	35	45	48	56	64	72	80	88	100
<div></div> ：預定進度 <div></div> ：實際進度												

## 第二章 集流時間的觀念發展

地表逕流主要來自於降水，是水文循環中最關鍵的階段之一。水在地表上移動，直到找到明確的排水路徑的過程被稱之為逕流。地表逕流在降雨高峰期和降雨後期尤其重要，它導致流量迅速增加，表徵著水文過程中的洪峰。地表逕流在許多議題中均扮演著重要的角色，如：流域管理需要準確估計逕流量；工程規劃也通常需要確定最大流量和水位；在污染物擴散、侵蝕量、沉積物產量等方面均與逕流量大小高度相關。

而集流時間(time of concentration,  $t_C$ )是指一部分水從水文流域內離開最遠處的水力點(hydraulically distant point)，到達流域出口所需的時間。 $t_C$ 是分析水文流域流量的常用參數之一 (Almeida et al. 2022)。確定  $t_C$  對於研究和項目中需要分析特定水文響應單元(HRU)對於特定降水事件的行為和響應非常有用。它能幫助我們了解水在流域內移動的速度和時間特性，對於水資源管理、洪水預測和水文模型的建立都具有重要意義。

集流時間概念最早可追溯自 Mulvaney (1850)，此位學者提出集流時間與最大逕流之間的關係，並討論了影響排水響應時間(response time)參數的特徵因素。Kuichling (1889)在研究紐約州羅徹斯特地區降雨與逕流關係時正式引入了這個術語。陳樹群(1999)提出常見的集流時間定義為：(1) 均勻降雨所匯集之水流由集水區最遠端流動至下游出口點或控制測點所需之時間；(2) 有效降雨組體圖中心至直接逕流歷線退水段反曲點之時間間距；(3) 有效降雨終止至直接逕流歷線退水段反曲點之時間間距。McCuen (2009)考慮到不同降雨事件和各自

的流量歷程，對集流時間進行了六種定義：(1) 從有效降雨結束到事件最終流量歷程轉折點(inflexion point)的時間；(2) 從有效降雨質心到直接逕流質心的時間；(3) 從最大降雨強度到最大流量時刻的時間；(4) 從有效降雨質心到直接逕流峰值時刻的時間；(5) 從有效降雨質心到總逕流達到峰值時刻的時間；(6) 從全量逕流開始到全量逕流峰值流量時刻的時間。這些不同的定義使得明確的集流時間估計方法不一，但儘管存在這種分歧， $t_c$ 的重要性是無庸置疑的。

本研究採用最具理論基礎且最被學界接受的陳樹群(1999)的第一種集流時間之定義，但由於均勻降雨處於理想狀況，因此僅能適用於小集水區。

對於由漫地流陸地平面和排水渠道組成的流域系統，流域的集流時間是陸上集流時間和渠道中傳播時間(time of travel)的總和(Overton and Meadows 1976)。Yen (1982)指出這兩個流程組件應該單獨評估，因為它們實際上是兩個獨立的順序系統。此外，Kibler and Aron (1983)表明，單獨考慮兩個流量分量的濃縮時間方法可以給出更好的估計。為了估計物理特性沿其長度變化的通道中的傳播時間，將通道劃分為段是適當的。對於這樣的劃分，從一個通道段的下游流出變為到下游相鄰通道段的上游流入。而使用運動波理論的一個優點是可以獲得某些理想化盆地和河道條件的解析解的可行性 (Stephenson 1981)。故本研究亦以運動波為出發點，推導集流時間公式。

## 第三章 集流時間公式的基本形態

由於許多集水區欠缺長年流量記錄資料，因此工程設計推估洪水量常採用合理化公式，但應用合理化公式時須先預估集流時間。而台灣現有之各家公式所估計之值常差異極大，且又缺少實測資料可供佐證，因此常造成無謂之爭議。若能由理論出發推導適合台灣使用之集流時間公式，可成為集水區治理規劃之重要參考依據。

### 第一節 從運動波理論推導集流時間公式

均勻流是指重力在水流方向的分量恰等於河床摩擦力時的力平衡狀況，此時水流沿程之水深及流速均不變。將水流流經之長度除以均勻流流速，所得即為水流的流達時間 (traveling time, reaching time)。最常見的均勻流流速公式為曼寧公式與崔西公式，巴伐利亞慣用公式也算是其一，但過於簡略導致適用性低。只要是以距離除以均勻流速來表示時間的觀念都非集流時間。

由降雨匯集而成之水流，其水深與流速都是距離的函數，亦即水深與流速會由集水區上游至出口下游逐漸增加，故為非均勻流 (non-uniform)，因此不論是經驗或是理論的集流時間公式都沒有水深及流速的因子 (陳樹群，1999；Singh, 1976；Beven, 2020)。由於無法求得均勻流速，當然也無法由水流流經之長度除以流速，來求得集流時間。由於集流時間求得困難，因此早年都是以坡度及坡長等地文因子進行回歸分析之經驗公式，雖然推求較為簡易，但較不具有物理意義 (王如意等人，1991)，即或有包含降雨特性的水文因子，但係以地域性迴歸為主，缺乏全面之適用性。

集流時間公式應由經驗公式逐漸朝向完整之坡地水理學觀念發

展。通常簡化自聖凡南方程式(de Saint Venant)方程式的運動波理論，較經驗回歸式具有更嚴謹之水理學基礎，可明確表示水流在坡面上的水深變化及移動距離，為集流時間理論的基礎。

運動波理論 (kinematic wave model) 可以下列方程式表示：

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i \quad (1)$$

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

(1)式為連續方程式，其中  $q$  表單寬流量， $h$  為水深；(2)式則為簡化之動量方程式， $\alpha$  與  $m$  為參數，代表單寬流量  $q$  與水深  $h$  的關係。一般可用於坡地薄層水流之分析。

小面積集水區坡面逕流主宰著集水區的集流時間（角屋睦與福島晟，1976）。因此，以單一坡面上之漫地流來探討均勻降雨強度  $i$  與集流時間  $t_c$  之簡化關係時，可先擬定下列假設：

- (1) 僅考慮單位寬度之單一坡面之漫地流流動，坡長為  $L$ 。
- (2) 降雨強度  $i$  在空間及時間上都為均勻分佈。
- (3) 有效降雨延時大於集流時間。
- (4) 坡面沒有入滲情況，即降雨皆以地表逕流形態流出集水區。

由於大集水區不符上述假設，故集流時間推求可謀以 SCS 等方法推求。而運動波理論具嚴謹之水理學基礎，可明確指出水流在坡面上的水深變化及移動距離，適用於小集水區。對層流流況而言，由 Darcy-Weisbach 可解得：

$$\alpha = \frac{8gS}{K_0 \nu}, \quad m = 3 \quad (3)$$

對於紊流流況，則可用曼寧公式(Manning's equation)：

$$\alpha = \frac{\sqrt{S}}{n}, \quad m = \frac{5}{3} \quad (4)$$

或崔西公式(Chezy equation)來表示：

$$\alpha = C_z \sqrt{S}, \quad m = \frac{3}{2} \quad (5)$$

其中  $\nu$  為運動黏滯度(kinematic viscosity)， $K_0$  為與地表覆蓋有關之粗糙係數。Woolhiser (1975)列出不同覆蓋時之  $K_0$  值以供計算使用查尋(陳和黃，1998)； $n$  為曼寧粗糙係數， $C_z$  為崔西係數。此三類中以曼寧粗糙係數最為常用，且其值之大小也最具有通用性。

將(2)式之單位寬度流量  $q$  對水深  $h$  微分可得：

$$\frac{dq}{dh} = \alpha m h^{m-1} = \frac{dx}{dt} = c_v \quad (6)$$

定義  $C_v$  為運動波波速，根據運動波理論，可得到下列關係(Eagleson, 1970)：

$$\frac{dq}{dx} = i_*; \quad \frac{dq}{dt} = c_v i_*; \quad \frac{dh}{dt} = i_*; \quad \frac{dh}{dx} = \frac{i_*}{c_v} \quad (7)$$

上式中  $x$  為沿坡面向下游之距離， $t$  為時間， $i_*$  為降雨強度。對於均勻降雨漫地流集流時間之推求，可採用 Eagleson (1970)的求解方法，其降雨條件可表示為：

$$i_* = \begin{cases} i_0 = \text{const.}, & 0 \leq t \leq t_r, & x \geq 0 \\ 0, & t > t_r, & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

上式中  $t_r$  為降雨延時，當初始條件(IC)及邊界條件(BC)分別為：

$$\begin{cases} h = 0, & t = 0, & 0 \leq x < L & (IC) \\ h = 0, & t > 0, & x = 0 & (BC) \end{cases} \quad (9)$$

則降雨延時大於集流時間的情況下，由(7)式

$$\frac{dh}{dt} = i_* = i_0 \quad (10)$$

$$\therefore h = i_0 t \quad (11)$$

上式代入(6)式可得

$$\frac{dx}{dt} = \alpha m h^{m-1} = \alpha m (i_0 t)^{m-1} \quad (12)$$

$$x = \alpha i_0^{m-1} t^m \quad (13)$$

此即為水波沿極限特性線(limiting characteristic curve)的移動狀況，當移動之距離  $x$  等於坡面長度  $L$  時，其所花費之時間，即為集流時間  $t_c$ ：

$$t_c = \left( \frac{L}{\alpha i_0^{m-1}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

若將(4)式之曼寧公式地形參數  $\alpha$  及  $m$  代入上式，則可獲得初步之運動波集流時間公式：

$$t_c = \frac{n^{0.6} L^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}} \quad (15)$$

## 第二節 國內外常見之集流時間公式

由於集流時間的重要性，存在大量的經驗/半經驗和解析  $t_c$  方程，且每個方程都是在某特定區域進行的研究的結果。由於公式眾多，研究人員和工程師經常受困擾而輕易選擇其中一個公式而不評估其準確性亦沒有將其與其他方法進行比較，在國內外均常見此等現象（Grimaldi et al., 2012; McCuen et al., 1984; Wong and Asce et al., 2005）。Azizian (2019) 以鹽稀釋追蹤方法 (salt dilution tracing approach) 獲得的值評估 36 集流時間公式。基於伊朗 Meime 河流域的七個子流域，結果表明對於該研究所採用之 36 個公式(表 3- 1)，誤差分佈為 2.6~132.8 分鐘。然而此研究是在河道中、於尋常流量期間(無雨日)進行的，故研究結果僅能作為參考。

同樣地，現常見之推估台灣地區集水區之集流時間之公式是否合適，值得進一步探討與驗證。陳樹群(1999)收集約 40 組集流時間公式，其中可概分為理論公式(見表 3-2)及經驗公式(見表 3-3)兩大類。



其中理論公式所列之公式大多與(15)式之型態。一般而言，前者具備較為完整之水理基礎，後者則由各集水區選取相關地文因子迴歸而得。經由分析發現不但各集流時間公式所估算之值差異極大，其所含蓋之因子亦多有不同。

表 3- 1 Azizian (2019)比較 36 集流時間經驗公式之誤差與評比

Equation	Goodness-of-fit indices						Sum of ranks
	RMSE: h	Rank	ME or bias: min	Rank	MRE or SB5: %	Rank	
Arizona DoT	0.58	11	-31.3	11	-63.4	11	33
Bransby Williams	1.88	29	105.9	32	223.0	33	94
Basso	0.28	7	16.3	8	35.8	9	24
California	0.17	4	5.9	3	11.0	3	10
Carter	0.28	8	-13.9	7	-26.0	6	21
Corps of Engineers	0.75	16	43.3	16	95.6	18	50
Desbordes	0.87	21	50.0	22	111.3	21	64
DNOS	0.13	2	5.9	4	14.4	5	11
Dooge	0.75	17	44.5	18	109.4	20	55
Eagleson	0.22	6	-11.8	6	-30.6	8	20
Epsey	22.59	36	132.8	36	295.6	36	108
Epsey-Winslow	0.80	19	-44.0	17	-90.8	15	51
FAA	0.76	18	43.1	15	92.6	16	49
Flavell	8.03	34	79.3	25	113.2	23	82
Giandotti	0.82	20	48.5	21	112.8	22	63
Haktanir-Sezen	3.54	33	109.8	35	274.1	35	103
Johnstone-Cross	1.74	28	100.9	31	221.7	32	91
Kerby-Hathaway	0.58	12	34.4	12	79.2	14	38
Kirpich-Pen	0.63	13	-35.5	13	-75.2	12	38
Kirpich-Ten	0.16	3	6.05	5	11.3	4	12
McCuen <i>et al.</i>	1.66	26	97.3	29	215.6	31	86
Pasini	1.23	24	62.4	23	122.6	24	71
Pickering	0.17	5	5.8	2	10.9	2	9
Picking	0.07	1	2.61	1	6.2	1	3
Pilgrim-McDermott	1.17	23	68.6	24	174.8	25	72
Ribeiro	1.63	25	95.3	27	211.7	30	82
Schaake <i>et al.</i>	0.41	9	-19.9	10	-36.3	10	29
SCS-lag	3.12	32	98.6	30	187.8	26	88
SCS-ave velocity	0.48	10	17.7	9	29.4	7	26
Sheridan	14.51	35	85.0	26	188.9	27	88
Simas-Hawkins	2.67	31	108.6	34	188.9	28	93
Temez	1.66	27	95.5	28	207.2	29	84
Van Sickle	0.72	15	-45.7	19	-94.9	17	51
Chow <i>et al.</i>	0.65	14	35.9	14	75.7	13	41
Ventura	0.90	22	46.2	20	95.6	19	61
Williams	1.88	30	106	33	223.2	34	97

(引用自 Azizian 2019)

表 3-2 集流時間理論公式

集流時間公式	符號意義	適用條件	參考文獻
$t_c = I^{(1-m)/m} \left( \frac{L}{\alpha} \right)^{1/m}$ <p>for Chezy's Eq. <math>\alpha = c_z S^{0.5}</math>, <math>m = 1.5</math>  for Manning's Eq. <math>\alpha = \frac{1}{n_m} S^{0.5}</math>,</p> $m = \frac{5}{3}$	$I$ : 降雨強度 $L$ : 坡長 $S$ : 地表坡度 $c_z$ : 崔西摩阻係數 $n_m$ : 曼寧摩阻係數	單一坡面上之漫地流	Henderson & Wooding (1964)
$t_c = 2.782 \frac{L^{0.6} n_m^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}}$	$I$ : 降雨強度( $\text{cm/hr}$ ) $L$ : 坡長( $m$ ) $S$ : 地表坡度( $\text{m/m}$ ) $n_m$ : 曼寧摩阻係數 $t_c$ : ( $\text{min}$ )	單一坡面上之漫地流	Agiralioglu & Singh (1981)
$t_c = \frac{1}{m} I^{(1-m)/m} \left( \frac{L}{2\alpha} \right)^{1/m} \left[ \frac{\Gamma(1 - \frac{1}{2m}) \Gamma(\frac{1}{m})}{\Gamma(1 + \frac{1}{2m})} \right]$	$\Gamma$ : Gamma 函數	扇形聚合坡面	Singh (1976)
$t_c = m \left( \frac{I}{2} \right)^{(1-m)/m} \left( \frac{1}{\alpha} \right)^{1/m} L^{1/m}$	$I$ : 降雨強度( $\text{cm/hr}$ )	扇形發散坡面	Singh (1988)
$t_c = 3.878 \frac{L^{0.6} n_m^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}}$	$I$ : 降雨強度( $\text{cm/hr}$ ) $L$ : 坡長( $m$ ) $S$ : 地表坡度( $\text{m/m}$ ) $n_m$ : 曼寧摩阻係數 $t_c$ : ( $\text{min}$ )	扇形發散坡面以曼寧公式求解	Singh (1988)
$t_c = \frac{1}{60} \left( \frac{0.007I + c}{S^{1/3}} \right) L \left( \frac{IL}{43200} \right)^{-2/3}$	$t_c$ : 集流時間( $\text{min}$ ) $L$ : 集水區長度( $\text{ft}$ ) $S$ : 漫地流路徑坡度( $\text{ft/ft}$ ) $I$ : 有效降雨( $\text{in/hr}$ ) $c$ : 地表粗糙係數	為美國公路局實驗室結果，針對馬路及草地等已開發單一坡面上之漫地流 $IL < 500$ 用於坡度大於 0.04 時需謹慎	Izzard (1946)
$t_c = 7 \frac{L^{0.6} n_m^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}}$	$I$ : 降雨強度( $\text{mm/hr}$ ) $L$ : 坡長( $m$ ) $S$ : 地表坡度( $\text{m/m}$ ) $n_m$ : 曼寧摩阻係數 $t_c$ : ( $\text{min}$ )	漫地流集水區	Ragan & Duru (1972)

$t_c = \frac{0.94L^{0.6}n^{0.6}}{I^{0.4}S^{0.3}}$	$I$ ：降雨強度( $\text{in/hr}$ ) $L$ ：漫地流長度( $\text{ft}$ ) $S$ ：平均漫地流坡度( $\text{ft/ft}$ ) $N$ ：曼寧糙度 $t_c$ ：( $\text{min}$ )	由已開發地的運動波地逕流分析所發展的漫地流公式，因 $I$ 與 $t_c$ 皆未知，故須反覆求算，I-D-F curve 的疊加可獲得 $t_c$ 的直接圖解	Morgali & Linsley (1965) Aron & Erborge (1973)
---	--	---	---

(陳樹群，1999)

表 3-3 集流時間經驗公式

集流時間公式	符號意義	適用條件	參考文獻
$t_c = \frac{LA^{0.4}}{DS^{0.2}}$	$L$ ：由流域邊界至出水口最遠之距( $\text{mile}$ ) $A$ ：流域面積( $\text{mile}^2$ ) $D$ ：與流域同面積之圓直徑( $\text{mile}$ ) $S$ ：沿著水流最直接路線每 100 $\text{ft}$ 坡面距離之平均落差( $\text{ft}$ )(%)	適用排水面積可高達 50 $\text{mile}^2$	Williams (1922)
$t_c = 13 \times 10^{-5} \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	$L$ ：主渠道最遠端至出水口距離( $\text{ft}$ ) $S$ 無因次比值，出水口與最遠端之高程差，近似流域平均坡度 $t_c$ ：( $\text{hr}$ )	田納西集水區 (Tennessee Watershed) 面積範圍 1~112 $\text{acre}$ 坡度變化 3~10 %	Kirpich (1940)
$t_c = 21.67 \times 10^{-6} \frac{L^{0.77}}{S^{0.5}}$	同上	賓夕凡尼亞集水區 (Pennsylvania Watershed)	Kirpich (1940)
$t_c = 60 \left( \frac{0.87L^3}{H} \right)^{0.385}$	$L$ ：沿集水區內最上游點至出口地點河道之水平距離( $\text{km}$ ) $H$ ：集水區內最上游點至出口地點河道之標高差( $\text{m}$ )	Kirpich 公式的延伸，由加利福尼亞州小型多山流域發展而來 或美國加州公路局應用於道路暗	California Culverts Practice (1942)

	$t_c$ : (min)	溝排水	
$t_c = 5\left(\frac{L}{S}\right)^{0.5}$	$L$ : 集水區內主要河川長度(mile) $S$ : 主要河流平均坡度( $\frac{ft}{mile}$ ) $t_c$ : (hr)	分析 Scotie 及 Sanduskey River 內 19 個集水區面積範圍 25~1624mile <sup>2</sup>	Johnstone & Cross (1949)
$t_c = 1.35\left(\frac{AL}{r}\right)^{0.37}$	$r$ : 為分叉因子	分析 Tasmanian rivers 內 7 個集水區面積範圍 48~322mile <sup>2</sup>	Eaton (1954)
$t_c = \frac{t_l}{0.60}$ $t_p = \sqrt{t_c} + 0.60t_c$	$t_l$ : 稽延時間 $t_p$ : 到達尖峰流量時間	分析三角形歷線	Mockus (1957)
$t_c = \left(\frac{2LN}{3S^{0.5}}\right)^{\frac{1}{2.14}}$ 公制 : $t_c = 1.44\left(\frac{LN}{S^{0.5}}\right)^{0.467}$	$L$ : 由漫地流排水區末端處至所定義渠道處之距離,與坡度方向平行(ft) $S$ : 末端處至漫地流終止處之高程除以兩點之水平距離( $\frac{ft}{ft}$ ) $N$ : 漫地流平均地表滯流係數 $t_c$ : (min)	漫地流 面積小於 10 acre 坡度小於 1 % $N$ 值 0.2~0.8 $L$ 值在 1200 ft 內	Kerby (1959)
線解圖		漫地流	丹佛政府區域會議 Denver Regional Council of Government (1969)
$t_c = 1.8 \frac{(1.1 - C)L^{0.50}}{S^{0.333}}$	$C$ : 逕流係數 $L$ : 漫地流長(ft) $S$ : 地表坡度(%) $t_c$ : (min)	使用於飛機場排水問題,亦常用於都市化集水區	Federal Aviation Administration (1970) 聯邦航空局
$t_c = \frac{100L^{0.8}\left[\left(\frac{1000}{CN}\right) - 9\right]^{0.7}}{1900S^{0.5}}$	$L$ : 集水區水力長度(最長流徑)(ft) $CN$ : SCS runoff curve number $S$ : 集水區平均坡度(%)	農業集水區資料配合 SCS 法而來,亦可適用於小於 2000acre 之小型都市化流	SCS lag equation (1973)

		域，對於混合區會有高估現象，對於渠道改進與不透水區可用校正因子來修正	
$t_c = \frac{1}{60} \sum \frac{L}{V}$	$L$ ：流徑長(ft) $V$ ：TR-55 中不同地表狀況的平均流速( $\frac{ft}{s}$ ) $t_c$ ：(min)		SCS average velocity charts (1975,1986)
$t_c = C_1 R_e^{-0.35} A^{0.22}$	$t_c$ ：(min) $R_e$ ：有效降雨強度( $\frac{mm}{hr}$ ) $R_e = IC$ $I$ ：降雨強度 $C$ ：洪峰逕流係數 $A$ ：集水區面積( $km^2$ ) $C_1$ 集水區地表係數		角屋 睦等 (1976)
$t_c = 0.01462 L_f^{0.5552} I_2^{-0.7164} S_{fm}^{-0.207}$	$L_f$ ：水流路線總長(ft) $I_2$ ：2-年頻率及 $t_c$ 小時降雨強度( $\frac{in}{hr}$ ) $S_{fm}$ ：渠道坡度( $\frac{ft}{mile}$ ) $t_c$ ：(hr)	都市化地區	McCuen, Wong and Rawls (1984)
$t_c = 0.0469 L_f^{0.445} I_2^{-0.7231} C_f^{0.5517} S_{fm}^{-0.226}$	$C_f$ ：艾斯培疏導係數 (Espey channelization coefficient)	都市化地區	McCuen, Wong and Rawls (1984)
$t_c = \frac{L}{V}$	$V = \begin{cases} 20 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.6} & (m/s) \\ 72 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.6} & (km/hr) \end{cases}$ $V = \begin{cases} 20 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.6} & (m/s) \\ 72 \left( \frac{H}{L} \right)^{0.6} & (km/hr) \end{cases}$ $V$ ：流速 $H$ ：集水區最上游至出水口之高差( $m$ 或 $km$ ) $L$ ：集水區最上游至出		Rziha

	水口之水平距離( $m$ 或 $km$ ) $t_c$ : ( $sec$ )或( $hr$ )		
$t_c = 372 A^{0.158} r_e^{-0.465}$	$A$ : 集水區面積( $km^2$ ) $r_e$ : 有效降雨強度( $mm/hr$ ) $t_c$ : ( $min$ )	參考角屋 睦公 式以選定之試驗 集水區 (蓮花 池、溪頭、坪 林) 實測資料迴 歸而得	陳明杰 (1995)
$t_c = 2.5 \frac{A^{0.5}}{S^{0.5}}$	$t_c$ : ( $hr$ ) $A$ : 集水區面積( $km^2$ ) $S$ : 集水區平均坡度 (比 值)		水土保持技術規範 (1996)
$t_c = 0.76 A^{0.38}$	$t_c$ : ( $hr$ )	適用於澳洲 New South Wales 東部	Pilgrim, McDermott and Mittelstadt
$t_c = \frac{0.005}{0.6} \times \left( \frac{LL}{\sqrt{S_c}} \right)^{0.64}$	$LL$ : 流長( $m$ ) $S_c$ : 平均坡度(%) $t_c$ : ( $hr$ )		Chow (1962)
$t_c = \frac{L^{\frac{3}{5}}}{81.65 \left( \frac{1}{n} \right)^{\frac{3}{5}} S^{\frac{3}{10}} I_e^{\frac{2}{5}}}$	$t_c$ : ( $hr$ ) $L$ : 流路長( $m$ ) $S$ : 平均坡度 $I_e$ : 超滲降雨強度( $m/hr$ ) $n$ : 曼寧粗糙係數	利用曼寧公式求 解單一坡面上之 漫地流	Gupta and Sinclair (1976)
$t_c = 1.7 \frac{L_m^{0.6}}{S_m^{-0.3}}$	$L_m$ : 流長 $S_m$ : 坡度	渠道 $A < 8 \text{ mile}^2$ $L_m < 7 \text{ mile}$ $S_m < 0.5\%$ $n : 0.013 \sim 0.025$ 由華盛頓地區資 料而來，適用於 自然河道及都市 地區下水道	Carter(1961)
$t_c = 0.0001852 \frac{n L_f}{R^{2/3} S_f^{1/2}}$		用以預估超滲降 雨質量中心至直 接逕流洪峰的時	Eagleson(1962)

		間間距適用於下水 道（管流） $A < 8 \text{ mile}^2$	
$t_c = 0.52 \frac{\phi L_f^{0.29}}{S_f^{0.145} I^{0.6}}$	$L$ ：渠道長 $S$ ：坡度 $\phi$ ：渠道化因子，取決於 渠道植生數與改進度	以休斯頓 (Houston)集水區 1964～1967 年實 測資料分析 17 個集水區 $A : 1 \sim 35 \text{ mile}^2$ 適用於漫地流	Espey and Winslow (1966)
$t_c = 0.009167 \frac{L_t^{0.13} L_m^{0.13}}{S_f^{0.065}}$	$L_t$ ：所有排水路徑及下水 道(管徑>36 in)總長 $L_m$ ：總流域長	以 Houston 資料 校正分析，適用 於渠道及漫地流 $A < 36 \text{ mile}^2$	Van Sickle(1969)
$t_c = 0.00032 \frac{L^{0.77}}{S_c^{0.385}}$	$L$ ：流域長度(m) $S_c$ ：流域平均坡度( $\frac{m}{m}$ ) $t_c$ ：(hr)		Watts and Chow (1985)
$t_c = 0.82 \left( \frac{LL_c}{\sqrt{S}} \right)^{0.38}$	$L$ ：沿本流至分水嶺最遠 點之距離(m) $L_c$ ：起點至集水區重心 點之距離(m) $S$ ：河川溪流坡度( $\frac{m}{m}$ ) $t_c$ ：(hr)		Linsley, et. al (1982) 水資會吳建民教授 轉化為公制
$t_p = 132 A^{0.46}$	$A$ ：集水區面積( $\text{km}^2$ ) $t_p$ ：稽延時間(min)		Fukushima(1976)

(陳樹群，1999)

### 第三節 集流時間應用限制

此外對於運動波於集流時間推估之應用，McCuen and Spiess (1995) 提出了一個建議，即  $\frac{nL}{S^{0.5}} < 100$  為運動波適用範圍，其中  $n$  是曼寧粗糙係數， $L$  是水平面流長度 (以 ft 為單位)， $S$  是坡度，用於應用運動波片狀流方程。此外，Kerby(1959)認為坡長  $L$  不能超過 400

公尺，Izzard (1946) 則取坡長 500 公尺為集流時間公式運用之極限，Kirpich (1940) 以面積表示，認為小集水區不得大於 300 公頃。以上這些集流時間應用範圍之建議，未來在研究中將納入分析。



## 第四章 敏感度分析

### 第一節 以 Ragan 集流時間公式為例進行敏感度分析

藉由敏感度參數可分析集水區相關因子對集流時間推估公式之影響範圍，以瞭解集流時間公式在不同集水區之適用性。以 Ragan 集流時間公式（見表 3-2，Ragan & Duru, 1972）為例，Ragan 公式係由運動波模式推導而來，且包含坡長( $L$ )、坡度( $S$ )、降雨強度( $I$ )、地表糙度( $n$ )等四參數，具有典型代表性。藉由敏感度參數可分析當上述四參數變化時，對集流時間之影響，以探討是否能進一步獲得適用於台灣之簡化之集流時間公式。

首先定義敏感度參數  $S_e$  為：

$$S_e = \frac{t_{ci} - t_{co}}{t_{co}} \quad (16)$$

式中  $t_{ci}$  代表改變參數後所得之值， $t_{co}$  為原來設計之值。選定之目標函數為 Ragan 集流時間公式，因 Ragan 公式係由運動波模式推導而來，且包含坡長、坡度、降雨強度、地表糙度等四參數，具有典型代表性。因此本研究以此四參數進行敏感性分析，其中以敏感度參數  $S_e$  為縱座標，集流時間公式中之四參數為橫座標作如圖 4-1。

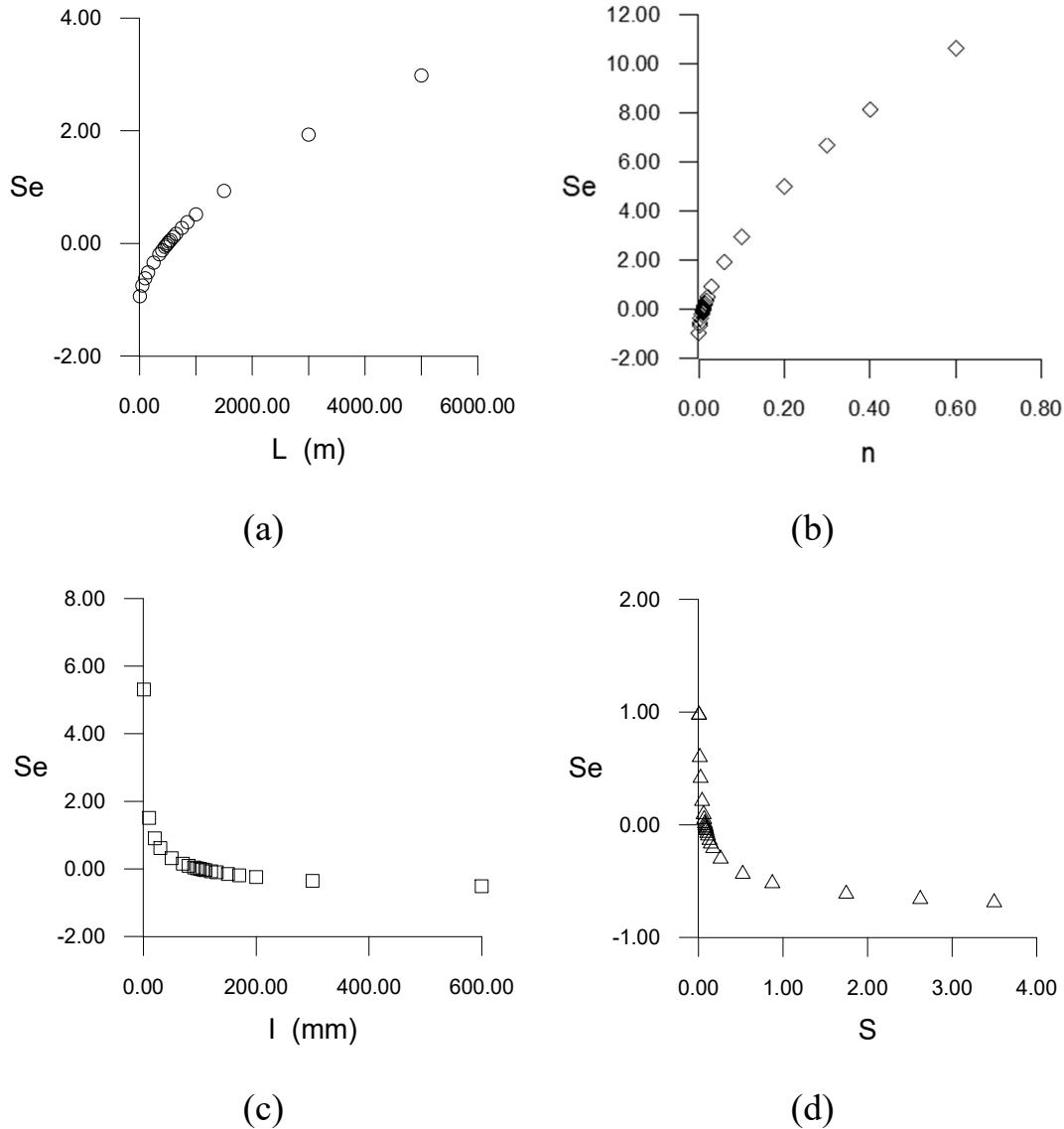


圖 4-1 運動波集流時間公式參數敏感度圖

圖 4-1 (a)及圖 4-1 (b)，坡長  $L$  與地表糙度  $n$  皆與  $S_e$  成正比例相關， $L$  或  $n$  值的變化愈大，對集流時間影響亦越大。降雨強度與地面坡度敏感度方面，隨著  $I$  及  $S$  值的增加呈指數遞減關係，由圖 4-1 (c) 可知  $I < 100 \text{ mm/hr}$  時，集流時間敏感度隨降雨強度漸增而劇減，當  $I > 100 \text{ mm/hr}$ ，敏感度  $S_e$  則趨近水平，意即大於  $100 \text{ mm/hr}$  之降雨強度對此集流時間公式的影響不顯著。依據水土保持技術規範中之降雨強度頻率分析，台灣地區 25 年或 50 年頻率之降雨強度一般均大於此值，因此在建立集流時間公式時，可將高降雨強度之因子轉為定常數值代

入(15)式，以刪除降雨強度之變數。對於地表坡度之敏感度關係圖 4-1(d)中，亦有相同之現象產生，大約以  $S=3.0$  (相當於  $70^\circ$ ) 為分界。當坡度高於  $70^\circ$  時，敏感度降低，但一般開發坡度均小於此坡度，因此坡度之變化仍具有高敏感性，必須計入集流時間公式之考慮因子。

## 第二節以台灣中上游集水區因子評估敏感度

使用 GIS 在台灣中上游集水區取一約  $25\text{km} \times 25\text{km}$  範圍作為採樣 (本次採樣位置位於旗山溪與荖濃溪上游)，並使用 GIS 功能進行子集水區劃分，共計劃分出約 552 個有效之子集水區，如圖 4-2 所示。集水區面積，平均大小約為 8.8 公頃，面積分佈大多介於 3 公頃~10 公頃之間，大致符合集流時間公式應用範圍。

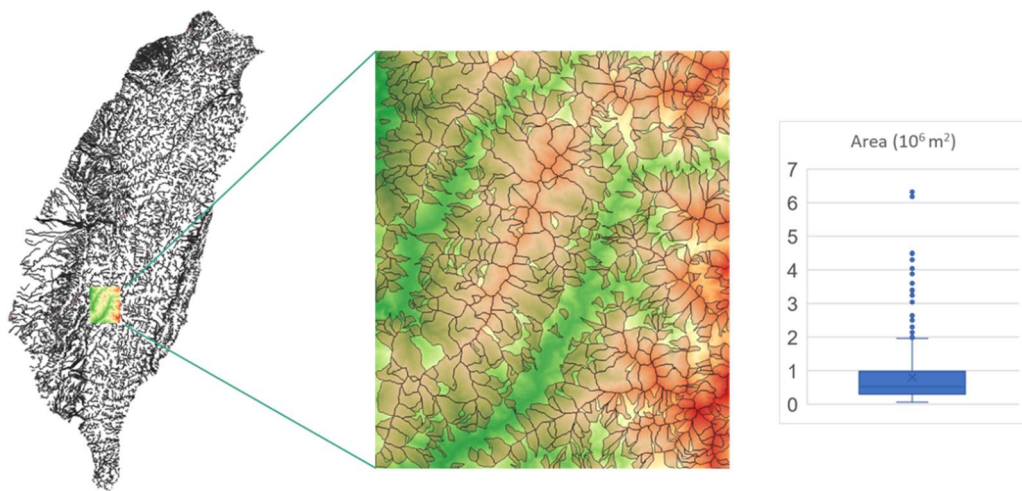


圖 4-2 以 GIS 進行集水區採樣

接著，計算各小集水區之坡長與平均坡度，並求中位數( $\mu$ )、一個標準差( $\pm 1\sigma$ )、與兩個標準差 ( $\pm 2\sigma$ )之值作為後續進行敏感度測試之標準。結果如圖 4-3，其中坡度分佈符合常態分佈， $\mu$  為  $33.2^\circ$ ； $\pm 1\sigma$  為  $38.2^\circ$ 、 $27.9^\circ$ ； $\pm 2\sigma$  為  $43.0^\circ$ 、 $22.3^\circ$ 。而坡長之分佈符合 log

分佈， $\mu$  為 1575 m； $\pm 1\sigma$  為 2651 m、936 m； $\pm 2\sigma$  為 4041 m、720 m。以  $I=90$  mm 為例，坡長與坡度分別為  $\mu - 2\sigma$ ,  $\mu$ ,  $\mu + 2\sigma$  時，集流時間分佈如圖 4-4。進一步，若將坡長與坡度均為中位數時之集流時間設定為  $t_c^*$ ，以不同統計分佈之集流時間  $t_c$  除以  $t_c^*$  得表 4-1、圖 4-5 及圖 4-6。結果發現，坡長因子之變化較坡度因子更為大，故可說坡長因子較坡度因子敏感。

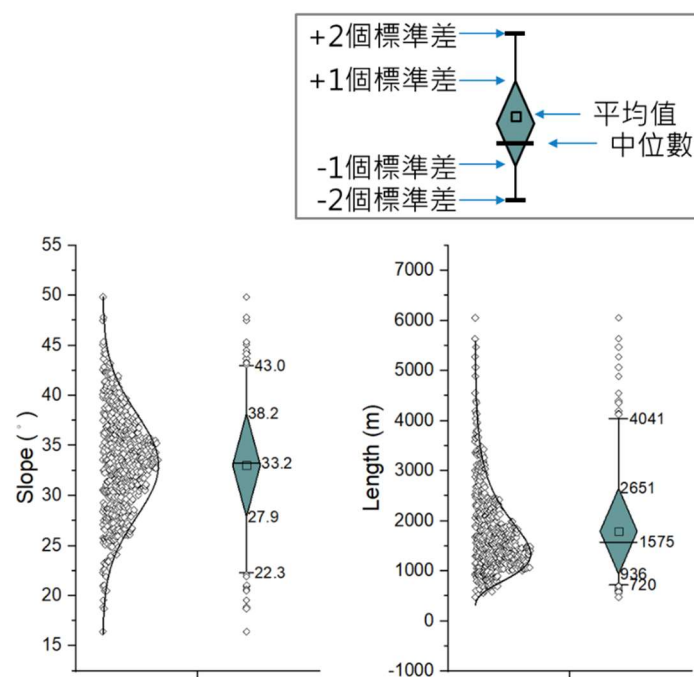


圖 4-3 以採樣之集水區之坡度與坡長分佈

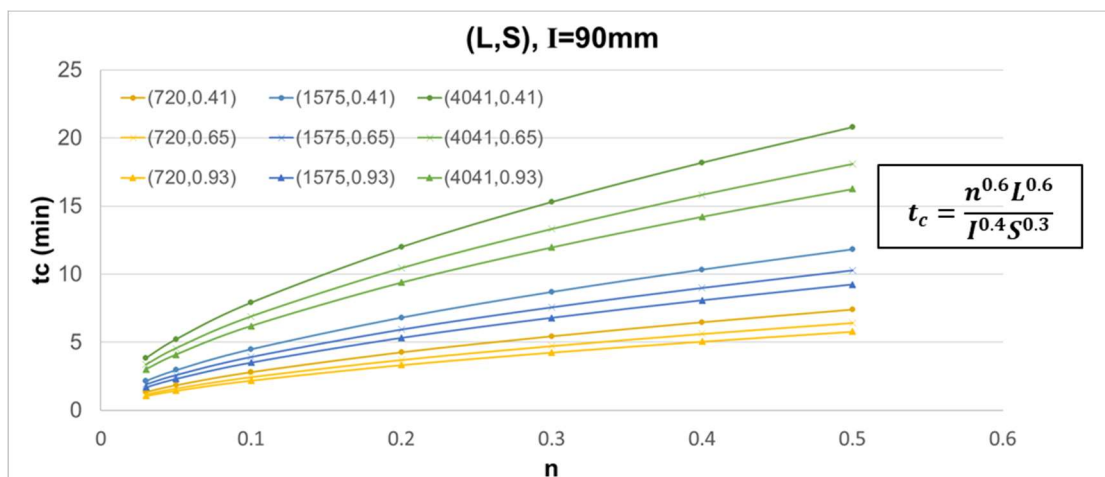
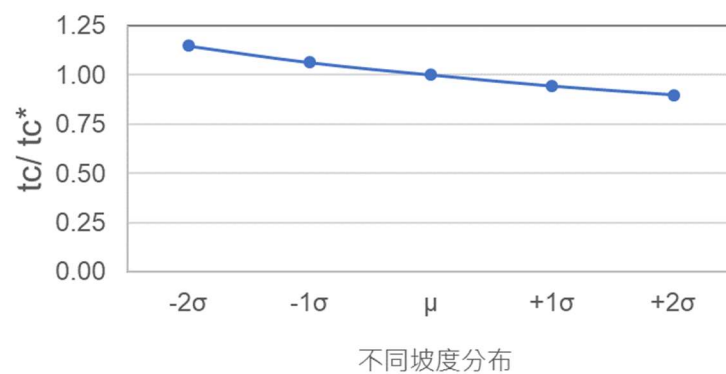
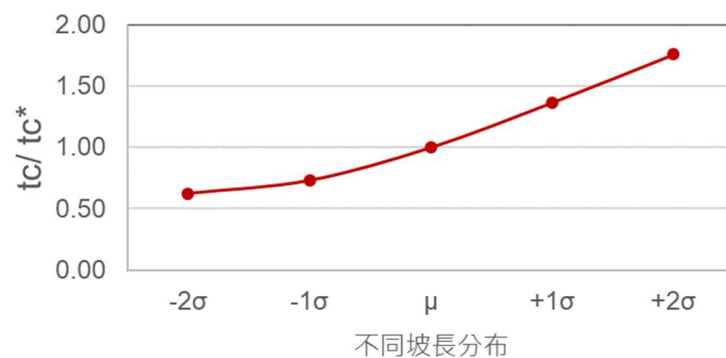


圖 4-4 坡長與坡度分別為  $\mu - 2\sigma$ ,  $\mu$ ,  $\mu + 2\sigma$  時集流時間變化表 4-1 以坡長與坡度均為中位數之集流時間為  $t_c^*$ ，與其他分佈之

集流時間之比例關係

		$\mu - 2\sigma$	$\mu - \sigma$	$\mu$	$\mu + \sigma$	$\mu + 2\sigma$
		L=720 m	L=936 m	L=1575 m	L=2651 m	L=4041 m
$\mu - 2\sigma$	S=0.41	0.72	0.84	1.15	1.57	2.02
$\mu - \sigma$	S=0.53	0.66	0.78	1.06	1.45	1.87
$\mu$	S=0.65	0.63	0.73	1.00	1.37	1.76
$\mu + \sigma$	S=0.79	0.66	0.69	0.94	1.29	1.66
$\mu + 2\sigma$	S=0.93	0.56	0.73	0.90	1.37	1.58

圖 4-5 坡度分別為  $\mu$ ,  $\mu \pm 1\sigma$ ,  $\mu + 2\sigma$  時集流時間變化圖 4-6 坡長分別為  $\mu$ ,  $\mu \pm 1\sigma$ ,  $\mu + 2\sigma$  時集流時間變化

### 第三節 以降雨頻率評估降雨強度之敏感度

考量台灣降雨量大情形，探討洪水時集流時間敏感度。以獨立山測站為例，以 Horner 公式，降雨延時為 60 分鐘計算，結果如表 4-2。

表 4-2 以獨立山測站為例，Horner 公式計算之降雨強度

累積百分比	重現期(年)	a	b	c	I (mm)
p=50%	2	1082	2.34	0.60	90.6
p=80%	5	844	23.3	0.50	92.4
p=90%	10	619	10.1	0.41	108.3
p=96%	25	498	0	0.35	118.8
p=98%	50	579	0	0.35	138.1
p=99%	100	701	0	0.36	160.5
p=99.5%	200	883	0	0.37	194.1

將上表之降雨強度以  $p=50\%$  (2 年重現期) 時計算之集流時間為基準  $t_c^*$ ，以不同統計分佈之集流時間  $t_c$  除以  $t_c^*$  得圖 4-7。其中，由於  $+1\sigma$  累積百分比約為 84%、 $+2\sigma$  累積百分比約為 97%，故仿照地文因子敏感性分析方法，得到在  $\mu+1\sigma$  處集流時間約為  $t_c^*$  的 0.95 倍；在  $\mu+2\sigma$  處集流時間約為  $t_c^*$  的 0.9 倍。降雨強度越大集流時間略為下降，但相對其他因子而言， $I$  敏感性低。故本研究建議可減少  $I$  參數於集流時間公式中，以便於應用於集水區規劃。

經由以上理論及敏感度之分析，本研究推導當高降雨強度時(例如 25 年或 50 年頻率之降雨強度)，高降雨強度之集流時間關係式為

$$t_c = \beta \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3} \quad (19)$$

上式中坡長單位為公尺，集流時間單位則為分鐘。 $\beta$  為一待定係數值，須配合實驗數據等修正之，惟其值應在 1.0 附近變動，因此可先設其為  $\beta=1.0$ 。

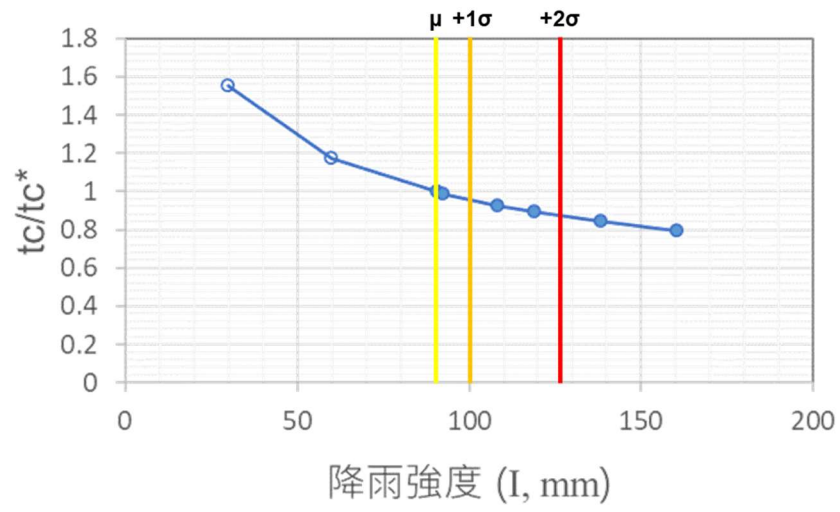


圖 4-7 降雨強度分別為  $\mu$ ,  $\mu+1\sigma$ ,  $\mu+2\sigma$  時集流時間變化

## 第五章 透過實驗數據檢定驗證係數

本研究使用室內人工降雨器和可調坡度渠槽進行試驗，以模擬均勻有效降雨條件下的漫地流狀態。我們以極限特性波(limiting characteristic curve)到達出口的時間作為集流時間的衡量指標。當極限特性波到達渠道出口點時，漫地流應呈現兩個特點：(i) 各點的水深達到穩定狀態並不再增加；(ii) 出口點的流量保持穩定。然而，降雨時雨滴飛濺的影響遠大於漫地流水深，因此傳統儀器無法準確測量漫地流水深。因此，本研究採用渠槽出口點流量歷線的測量數據，來推導出口點漫地流的集流時間，以驗證高強度降雨下的集流時間模式。而由試驗開始到達平衡時間為漫地流流量達到穩定狀態的時間即為集流時間。

### 第一節 試驗配置與結果

實驗水槽為可調坡度水槽，矩形水槽長 8 m，寬 0.3 m，最大坡度可達 0.2，兩側嵌入玻璃牆以便在進行試驗時觀察變化，如圖 5-1 所示。本實驗的降雨條件為均勻降雨。在本實驗中，在水槽上方安裝了五組人工降雨模擬器，長度為 7.25 m，寬度為 0.3 m，高度為 1 m，其目的是設置準確的降雨強度，以便觀察側向流引起的空間變化流量。雨滴撞擊對流量歷線的影響不大，因此設備只需提供穩定的側向流以滿足實驗條件。流量歷線是以測量水桶進行記錄。使用的相機可以在 1 秒內記錄 240 張圖像，最小時間間隔可測量至 1/240 秒，滿足本實驗精確測量的要求。可以從測量的體積和時間間隔計算出該時間點的平均流量。時間間隔越短，計算出的流量越接近暫態流量，這樣操作



可以得到離散形式樣本資料的實際逕流流量歷線。

在本研究中，在均勻降雨條件下進行了總共 120 組集流時間的試驗。每組實驗的設計條件如表 5- 1~表 5- 3 所示。實驗中使用了三種底面粗糙度，即鋼板(S)、覆蓋礫石表面(G)和覆蓋人工草坪表面(T)，如圖 5- 1 所示。每次試驗後校準降雨強度。坡度的變化範圍為 0.01 至 0.2。接著，每場試驗中出流量達到穩定之時間即為集流時間(如圖 5- 2)。每場實驗所求知集流時間亦列於表 5- 1~表 5- 3。最後將各場實驗之  $L$ 、 $S$ 、 $n$  代入。以推求  $\beta$  值，最後得圖 5- 3， $\beta$  大多分佈於 0.78~0.88 之間。藉由回歸，得出(19)式中  $\beta$  應近似於 0.83(圖 5- 4)。即高降雨強度下，集流時間公式可寫作：

$$t_c = 0.83 \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3} \quad (20)$$

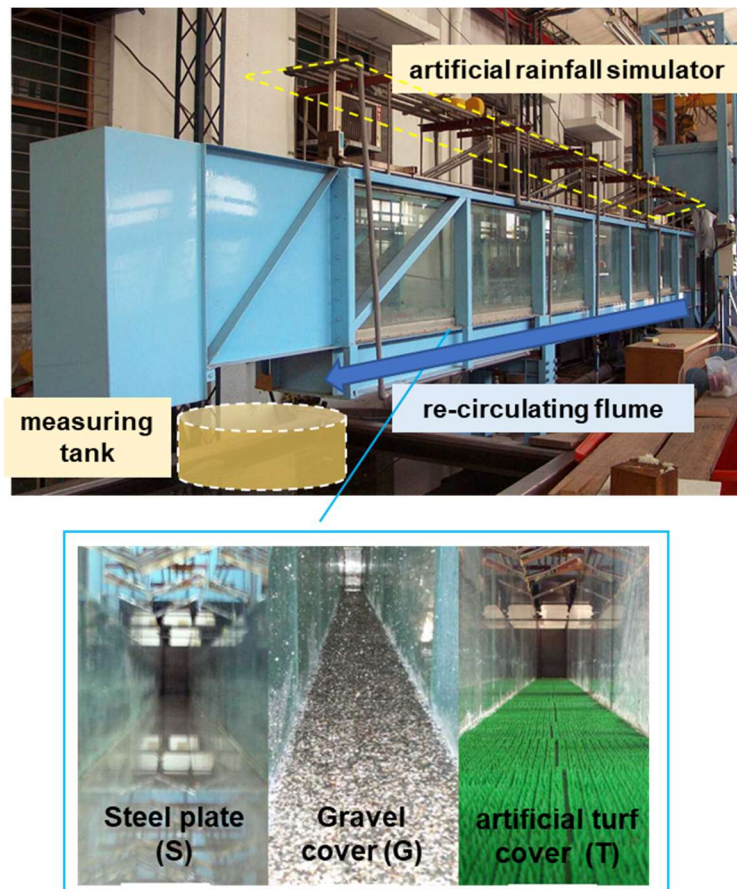


圖 5- 1 試驗配置

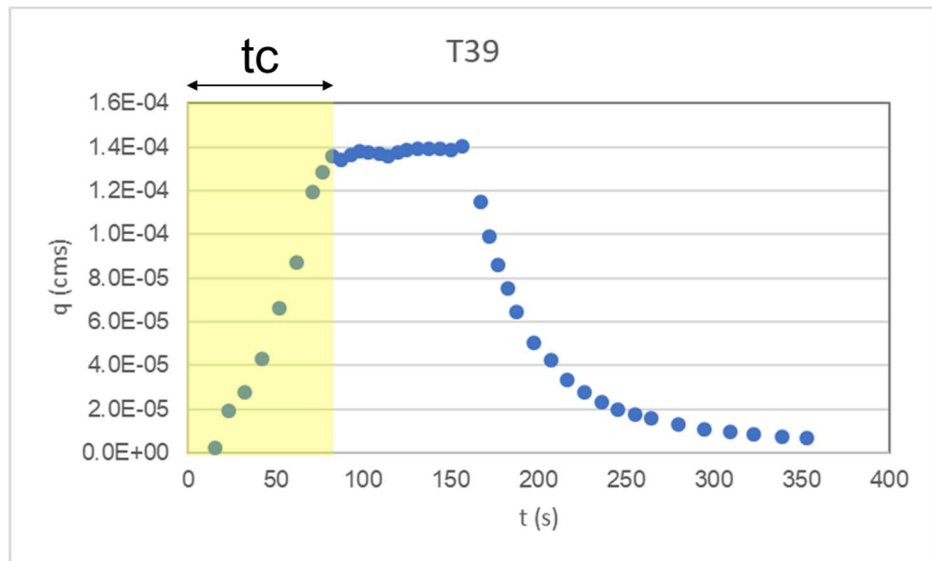


圖 5-2 集流時間估計方式(範例)

表 5- 1 漫地流水槽實驗之水力條件與實驗結果(鋼板)

鋼板	S	I (mm)	$t_c$ (s)	n
T1	0.01	205.9	54	0.004
T2	0.01	208.7	47	0.024
T3	0.01	198.4	54	0.040
T4	0.01	192.3	42	0.023
T5	0.02	199.2	40	0.015
T6	0.02	205.6	36	0.012
T7	0.02	199.3	35	0.012
T8	0.02	195.8	34	0.009
T9	0.03	192.9	30	0.008
T10	0.03	196.0	35	0.013
T11	0.03	195.6	32	0.015
T12	0.05	190.0	29	0.011
T13	0.01	228.2	38	0.009
T14	0.01	242.9	44	0.010
T15	0.02	236.3	32	0.010
T16	0.02	236.3	32	0.008
T17	0.02	236.5	39	0.010
T18	0.02	236.3	35	0.009
T19	0.03	232.1	29	0.009
T20	0.03	232.1	26	0.008
T21	0.03	229.1	28	0.009
T22	0.04	241.2	22	0.007
T23	0.04	241.2	26	0.009
T24	0.04	240.5	26	0.007
T25	0.05	237.3	22	0.008
T26	0.05	237.3	20	0.007
T27	0.05	237.3	24	0.009
T28	0.05	238.1	23	0.008
T29	0.07	232.0	22	0.008
T30	0.07	232.0	19	0.009
T31	0.07	228.9	25	0.011
T32	0.07	232.0	22	0.008

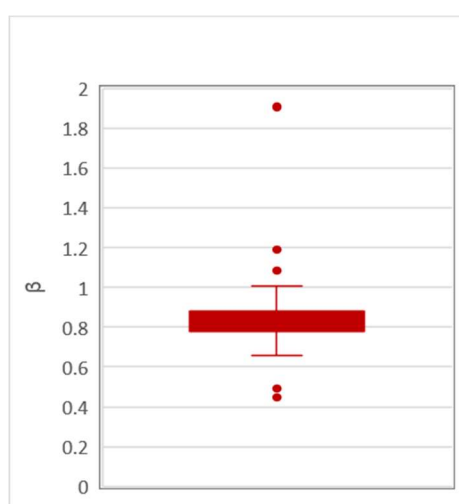
表 5-2 漫地流水槽實驗之水力條件與實驗結果(礫石)

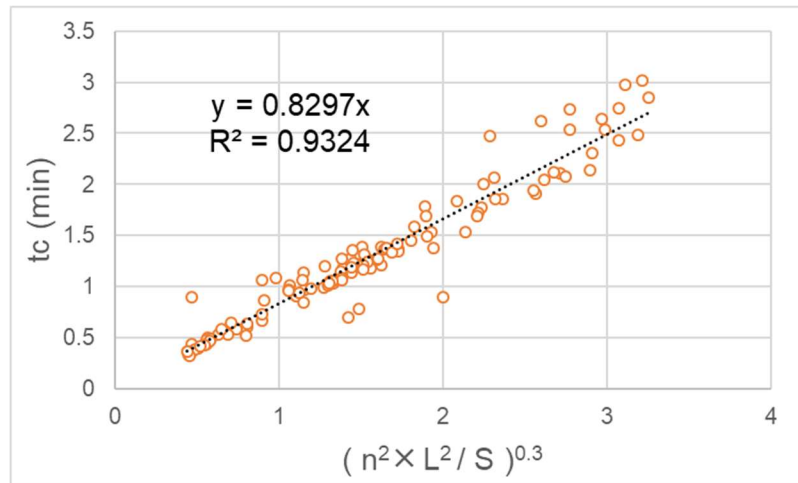
碎石	S	I (mm)	$t_c$ (s)	n
T33	0.01	233.6	107	0.036
T34	0.01	234.4	83	0.038
T35	0.01	232.9	102	0.036
T36	0.01	233.2	110	0.043
T37	0.03	228.4	83	0.043
T38	0.03	228.3	73	0.049
T39	0.03	230.7	82	0.054
T40	0.03	219.0	76	0.045
T41	0.05	239.3	71	0.048
T42	0.05	228.6	72	0.042
T43	0.05	231.4	76	0.051
T44	0.05	230.8	76	0.048
T45	0.07	223.1	58	0.042
T46	0.07	230.5	60	0.050
T47	0.07	228.9	62	0.053
T48	0.07	225.5	64	0.054
T49	0.02	239.2	66	0.030
T50	0.02	237.0	83	0.040
T51	0.02	237.8	79	0.036
T52	0.02	236.3	82	0.040
T53	0.10	231.9	52	0.034
T54	0.10	229.5	54	0.047
T55	0.10	233.3	56	0.048
T56	0.10	231.9	59	0.053
T57	0.14	229.0	61	0.052
T58	0.14	229.1	65	0.045
T59	0.14	229.9	58	0.051
T60	0.14	228.8	68	0.059
T61	0.20	225.3	64	0.046
T62	0.20	226.0	58	0.061
T63	0.20	224.3	64	0.069
T64	0.20	226.8	51	0.070

表 5-3 漫地流水槽實驗之水力條件與實驗結果(草地)

草地	S	I (mm)	$t_c$ (s)	n
T65	0.01	221.4	149	0.050
T66	0.01	222.7	157	0.062
T67	0.01	222.4	152	0.068
T68	0.01	207.6	164	0.068
T69	0.01	225.1	171	0.089
T70	0.01	222.0	178	0.083
T71	0.01	223.5	159	0.077
T72	0.01	222.0	181	0.088
T73	0.02	228.2	165	0.115
T74	0.02	218.2	149	0.122
T75	0.02	226.8	146	0.115
T76	0.02	227.8	152	0.109
T77	0.03	225.8	139	0.128
T78	0.03	223.6	126	0.115
T79	0.03	225.3	128	0.128
T80	0.03	222.7	125	0.117
T81	0.04	226.0	115	0.120
T82	0.04	225.0	127	0.129
T83	0.04	224.1	123	0.125
T84	0.04	220.8	116	0.119
T85	0.05	222.3	124	0.113
T86	0.05	220.5	120	0.108
T87	0.05	220.5	112	0.117
T88	0.05	221.7	111	0.113
T89	0.06	221.5	92	0.108
T90	0.06	224.1	106	0.117
T91	0.06	223.1	104	0.115
T92	0.06	223.3	101	0.114
T93	0.08	201.7	92	0.106
T94	0.08	200.3	95	0.097
T95	0.08	200.0	90	0.103
T96	0.08	200.1	87	0.094
T97	0.10	186.0	83	0.092
T98	0.10	198.4	81	0.098

<b>T99</b>	0.10	198.7	80	0.094
<b>T100</b>	0.10	197.5	85	0.098
<b>T101</b>	0.12	208.8	74	0.090
<b>T102</b>	0.12	209.2	76	0.094
<b>T103</b>	0.12	206.8	70	0.091
<b>T104</b>	0.12	206.3	76	0.095
<b>T105</b>	0.14	214.5	75	0.096
<b>T106</b>	0.14	212.5	72	0.093
<b>T107</b>	0.14	214.5	73	0.089
<b>T108</b>	0.14	216.1	70	0.093
<b>T109</b>	0.16	219.8	68	0.092
<b>T110</b>	0.16	220.9	74	0.093
<b>T111</b>	0.16	217.9	82	0.092
<b>T112</b>	0.16	217.3	71	0.092
<b>T113</b>	0.18	221.0	67	0.090
<b>T114</b>	0.18	221.5	69	0.090
<b>T115</b>	0.18	221.2	65	0.091
<b>T116</b>	0.18	222.4	64	0.090
<b>T117</b>	0.20	217.3	63	0.087
<b>T118</b>	0.20	217.2	61	0.085
<b>T119</b>	0.20	220.3	63	0.089
<b>T120</b>	0.20	218.6	62	0.087

圖 5-3 各場次試驗結果之 $\beta$ 值分佈

圖 5-4 試驗結果之 $\beta$ 值率定

## 第二節 集流時間公式解讀

而(20)式可以圖 5-5 的型式表示。圖 5-5 中  $x$  軸為變數  $nL$  之積、 $y$  軸為變數  $S$ ，將相同  $t_c$  以等值線表示。以小集水區坡面而言， $nL$  與  $S$  的範圍推測應位於圖 5-5 中黃色虛線方框內，故而又得到圖 5-6。由圖 5-6 可以看出，當  $nL$  乘積較小時（即坡面較短或集水區較小時），坡度  $S$  影響性相對較小。然若  $nL$  乘積大時，坡度  $S$  越小集流時間越大，且有明顯之影響。

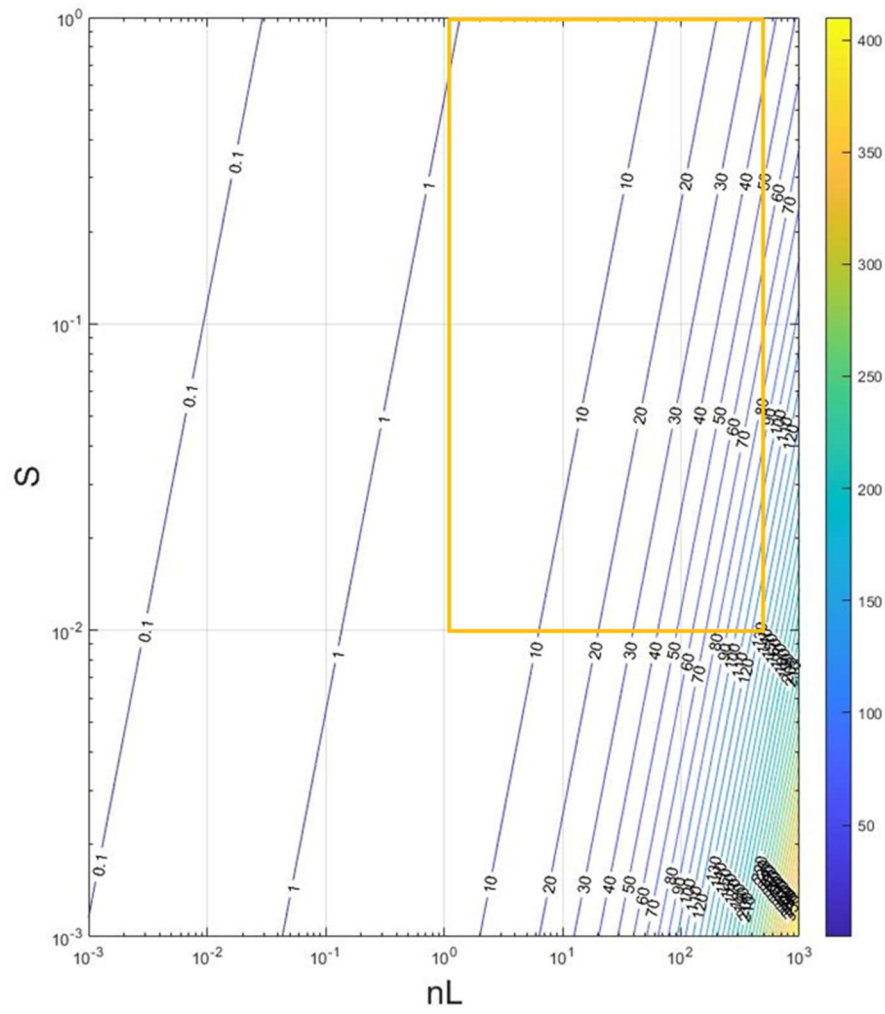


圖 5- 5  $\beta=0.83$  之集流時間關係式



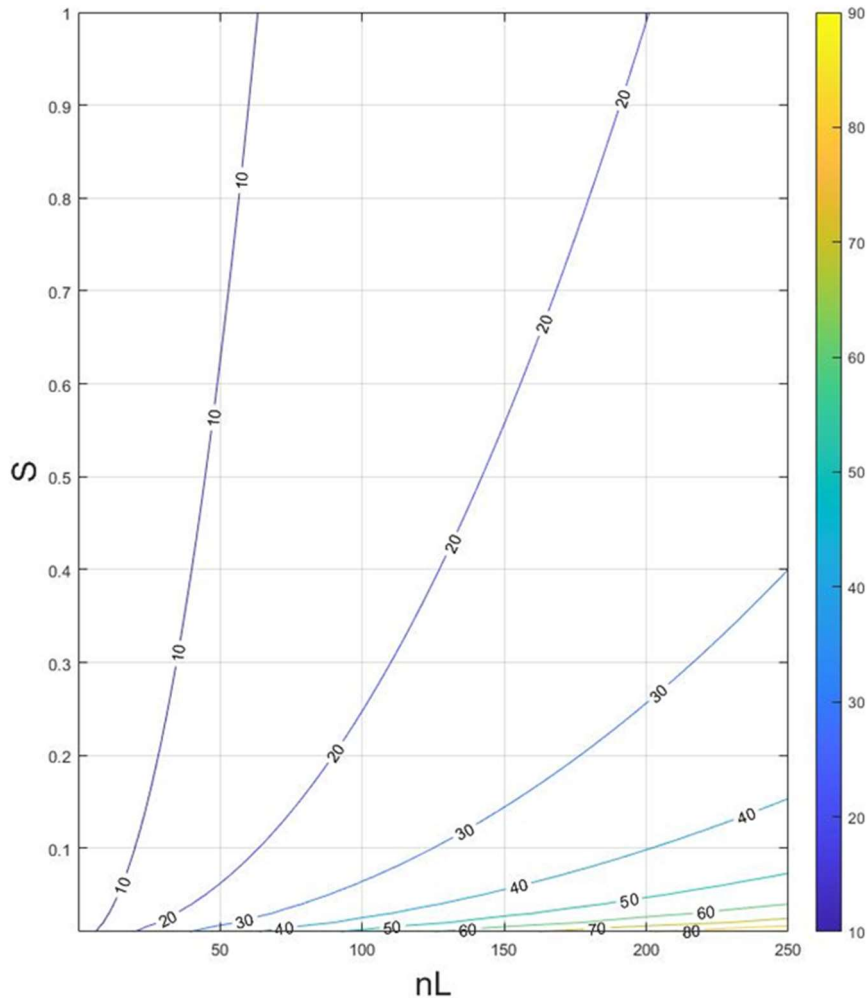


圖 5-6  $\beta=0.83$  集流時間關係式之小集水區合理範圍分佈

### 第三節 試驗結果與其他公式比較

而本公式與表 3-2 中諸多公式均為(15)式之型態，僅係數不同，若將係數與降雨強度之影響列入考量，即為考量不同 $\beta$ 值之集流時間關係式，如表 5-4 所示。而若將本次實驗結果與表 5-4 之公式相比較則得到圖 5-7。而不同公式的公式圖則如圖 5-8 所示。若直接比較公式間所求得的集流時間差異，則如圖 5-9，Agiralioglu & Singh (1981)、Singh (1988)、Ragan & Duru (1972)，分別為本公式之 1.34、1.86 及 0.84 倍。而 Singh (1988)所估算之集流時間約為 Ragan & Duru (1972)

之 2.2 倍。

表 5-4 前人之集流時間公式以  $I = 100 \text{ mm/hr}$  考量之結果

集流時間公式	以 $I = 100 \text{ mm/hr}$ 條件代入之結果	適用條件	參考文獻
$t_c = 2.782 \frac{L^{0.6} n_m^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}}$	$t_c = 1.11 \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3}$	單一坡面上之漫地流	Agiralioglu & Singh (1981)
$t_c = 3.878 \frac{L^{0.6} n_m^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}}$	$t_c = 1.54 \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3}$	扇形發散坡面以曼寧公式求解	Singh (1988)
$t_c = 7 \frac{L^{0.6} n_m^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}}$	$t_c = 0.7 \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3}$	漫地流集水區	Ragan & Duru (1972)

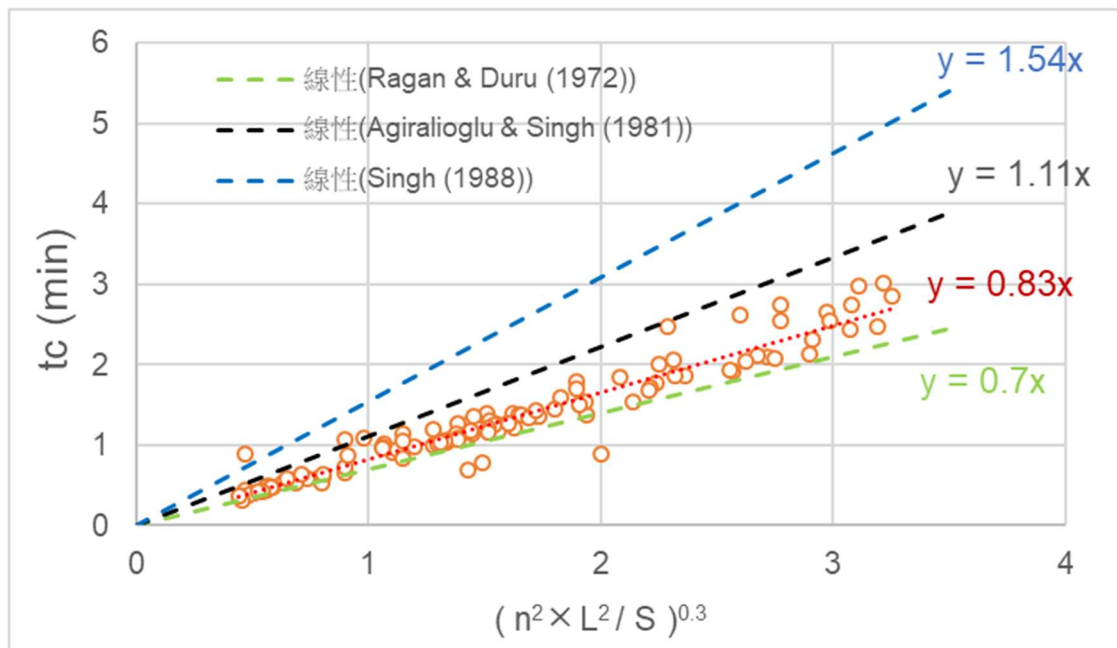


圖 5-7 其他集流時間公式與本次實驗之比較

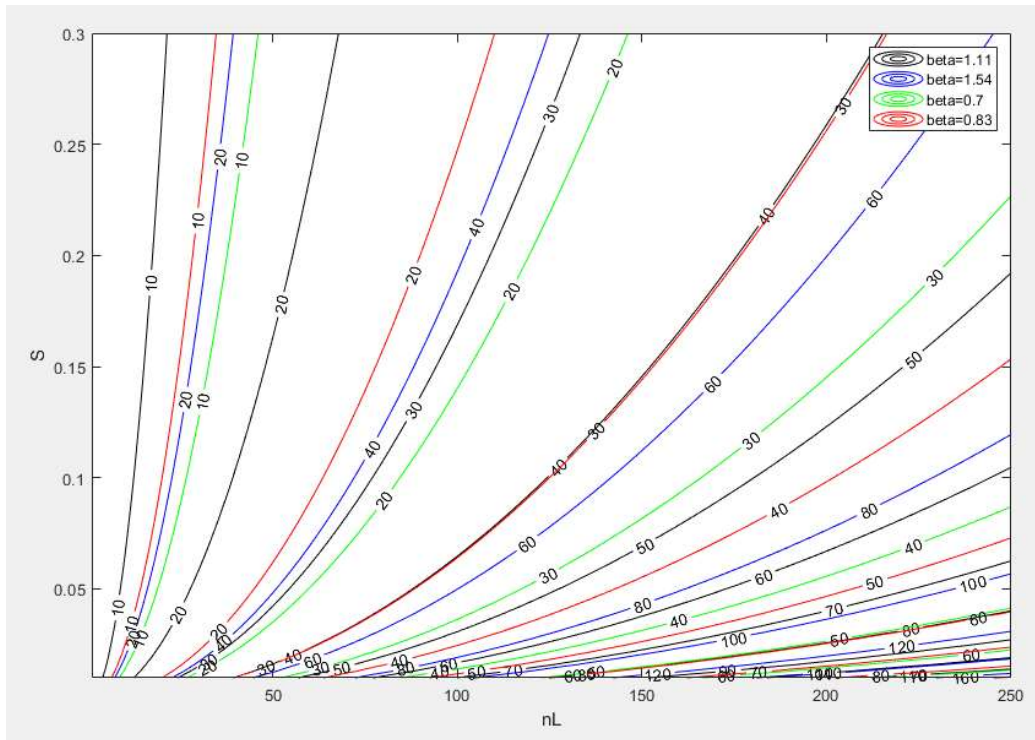


圖 5-8 不同 $\beta$ 值之集流時間關係式之公式圖差異

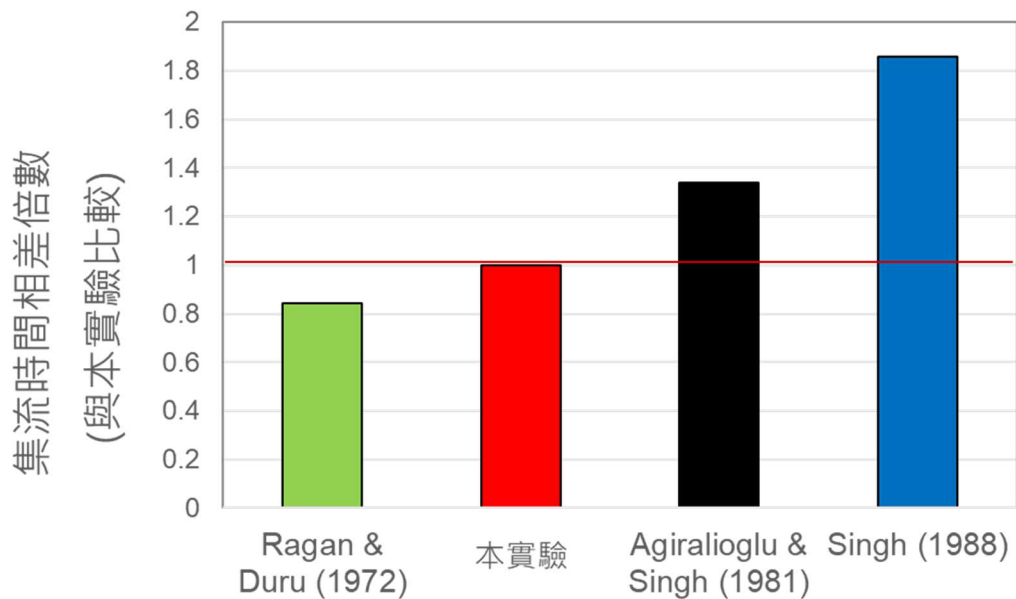


圖 5-9 不同 $\beta$ 值之集流時間關係式之計算結果倍數差異

#### 第四節 試驗結果與水土保持技術規範第 19 條流入時間之建議流速比較

根據水土保持技術規範第 19 條：集水區之集流時間指逕流自集

水區最遠一點到達一定地點所需時間，一般為流入時間與流下時間之和。其中流入時間  $t_1$  (即本計畫所探討之集流時間)，計算公式如下：

$$t_1 = l/v$$

$l$ ：漫地流流動長度，

$v$ ：漫地流流速（一般採用 0.3 至 0.6 公尺/秒）。

為了解此漫地流流速建議採用值與本經驗公式之差異，故將本計畫之(20)式，以坡長除之並換算成公尺/秒單位，結果如圖 5- 10。圖 5- 10 顯示，不同  $n$  值流速將具有很大的差異，以  $n=0.1$  與  $n=0.7$  為例，兩者約相差 3 倍。圖中著色處為與規範建議流速範圍吻合處，由圖中可以看出，在高曼寧  $n$  值的情況下( $n=0.7$ , 藍色)，小型坡面及坡度較緩處，使用原技術規範建議之流速將會過於高估流速、低估集流時間；相同的在低曼寧  $n$  值的情況下( $n=0.1$ , 紅色)，大型坡面及坡度較陡處，使用原技術規範建議之流速將嚴重於低估流速、高估集流時間。而  $n=0.3$  的情況下(黃色)則可能出現高估與低估的情形。

此外，同時更凸顯，現有之技術規範無法反映  $n$  值與坡度對集流時間造成之變化。而在流速採用時亦較無依據。

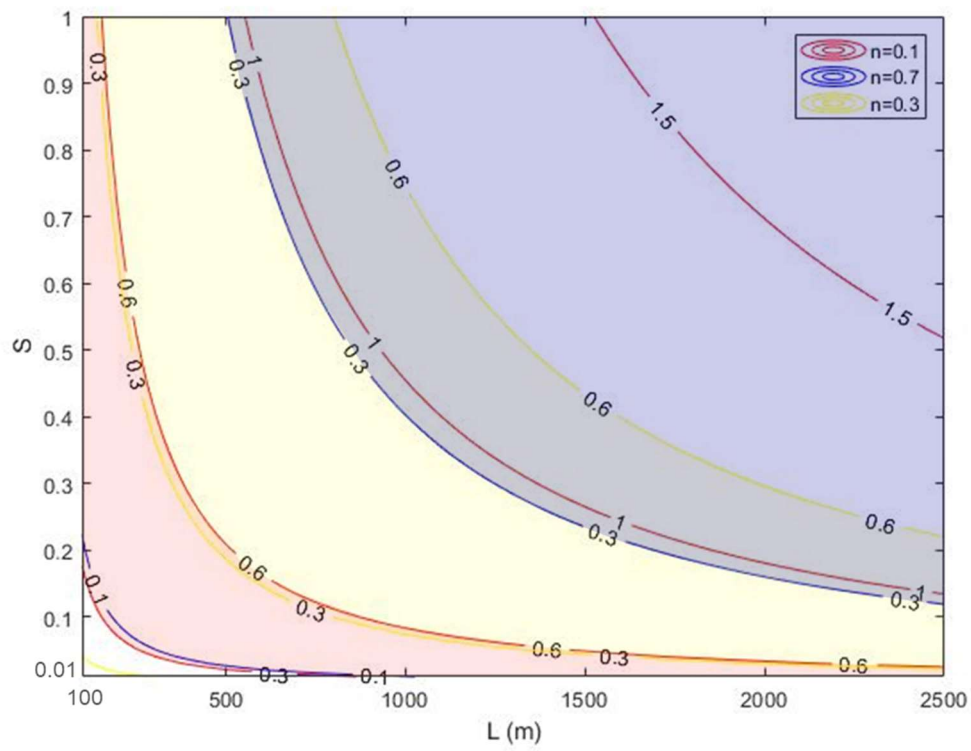


圖 5-10 (20)式之流速(m/s)在不同曼寧  $n$  值下計算結果

## 第六章 召開國內外相關領域之學者討論會

本計畫已多次召開學者討論會：

今年 4 月 INTERPRAEVENT 舉辦期間，許多國內外學者參與會議，故藉此機會與學者討論集流時間公式與實驗設計。討論會參與者包含陳樹群教授、Prof. Vijay P. Singh、Prof. Frank T.-C. Tsai、邱彥瑜博士、陳弘恩博士(圖 6- 1)。我方於會前先準備討論資料，包含 100 多場之實驗設置與數據分析。並就研究設計、研究限制、其他可能之分析作法進行了討論，並討論實驗結果可應用之集水區範圍。Prof. Vijay P. Singh 提共了許多建議，並表達後續再進行交流的意願。

會議重點紀錄如下：

1. 集水區降雨逕流條件，會受到移動暴雨影響，故在大集水區的集流時間、逕流沖刷、汙染物等議題考量應將移動暴雨納入評估。
2. 以小集水區而言，在降雨延時大於集流時間的情形可以本研究發展之集流時間模式進行推估，以供設計。
3. 小集水區之水流移動到集水區出口之時間可以本研究之集流時間估算，若屬大集水區則總時間為集流時間、溪間之 travel time 與幹流之 channel time 之加總，但視評估的方法與目的可以適度簡化。
4. 上述小集水區的定義：以  $100 \text{ mile}^2$  內為主(約  $260 \text{ km}^2$ )
5. 若有 15m 長以上之渠道可配合移動暴雨進行試驗設計。
6. 若有現場資料可以數模檢定驗證、進行集流時間計算。



圖 6-1 學者討論會照片

此外於本計畫草案階段亦曾於 2022/10/26，於中興水保系與系內教師共同討論集流時間公式推導之作法。並於 2023/11/3 發送公文邀請國內專家學者一起參與討論，公文見圖 6-2。本次會議參與者包含：陳樹群教授、周憲德教授、馮正一教授、謝平城教授、吳俊銘副教授、吳俊毅副教授、張高華助理教授、邱彥瑜博士。我方於會前先準備討論資料，包含芮哈公式的朔源、集流時間公式的推導、敏感度分析結果、試驗設計與結果、公式比較等。會議重點紀錄如下：

- 1.本計畫建議水土保持法規第 19 條流入時間採用運動坡模式(即(20)式)估算，而流下時間則建議以曼寧公式計算，(刪去芮哈(Rziha)經驗公式)。
- 2.針對本計畫之動機與必要性與會之國內學者多表示認同，但建議應注意嚴謹性。
- 3.建議比較此漫地流流速建議採用值與本經驗公式之差異。(5-4 節即為因應本項建議所補充之結果討論)
- 4.現有之技術規範無法反映  $n$  值與坡度對集流時間造成之變化。而在流速採用時亦較無依據，在業界採用時也造成困擾。



抄件

檔 號：  
保存年限：

國立中興大學 函

機關地址：40227臺中市南區興大路145號  
承辦人：陳淑君  
聯絡電話：04-22840381轉666

受文者：陳樹群特聘教授(本校水土保持學系)

發文日期：  
發文字號：  
類別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：

主旨：本校水土保持學系陳樹群教授為「建立台灣適用之集流時間估算方式」，分析水土保持法規第19條之適切性，特邀集相關領域學者視訊及實體召開討論會，詳如說明，請查照。

說明：

- 一、討論會日期：112年11月3日(星期五)，上午10點00分。
- 二、討論會地點：本校水土保持學系一館2樓系辦旁小會議室。
- 三、Google Meet 會議視訊連結：<https://meet.google.com/fxs-rbqe-fpy>。

正本：段錦浩退休教授、連惠邦特聘教授(逢甲大學水利工程與資源保育學系)、李光敦特聘教授(國立臺灣海洋大學河海工程系)、周憲德教授(國立中央大學土木工程學系)、劉格非教授(國立臺灣大學土木工程學系)、謝正倫教授(國立成功大學水利及海洋工程學系)、吳俊銘副教授(逢甲大學水利工程與資源保育學系)、詹勳全主任(本校水土保持學系)、謝平城教授(本校水土保持學系)、王咏潔教授(本校水土保持學系)、吳俊毅副教授(本校水土保持學系)、洪啟權副教授(本校水土保持學系)、張高華助理教授(本校水土保持學系)

副本：

校 長 詹 〇 〇

本案依分層負責規定授權單位主管決行

第1頁 共1頁

圖 6-2 本計畫召開之學者討論會公文紀錄 (2023/11/03)

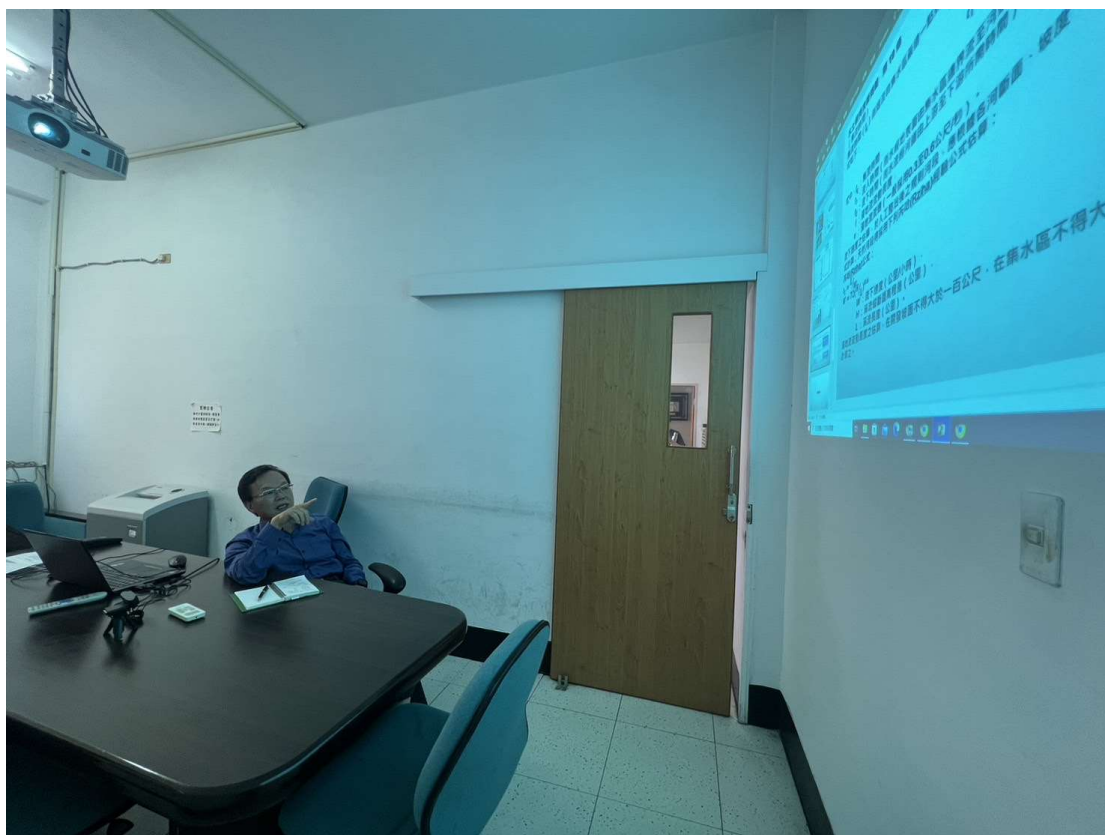
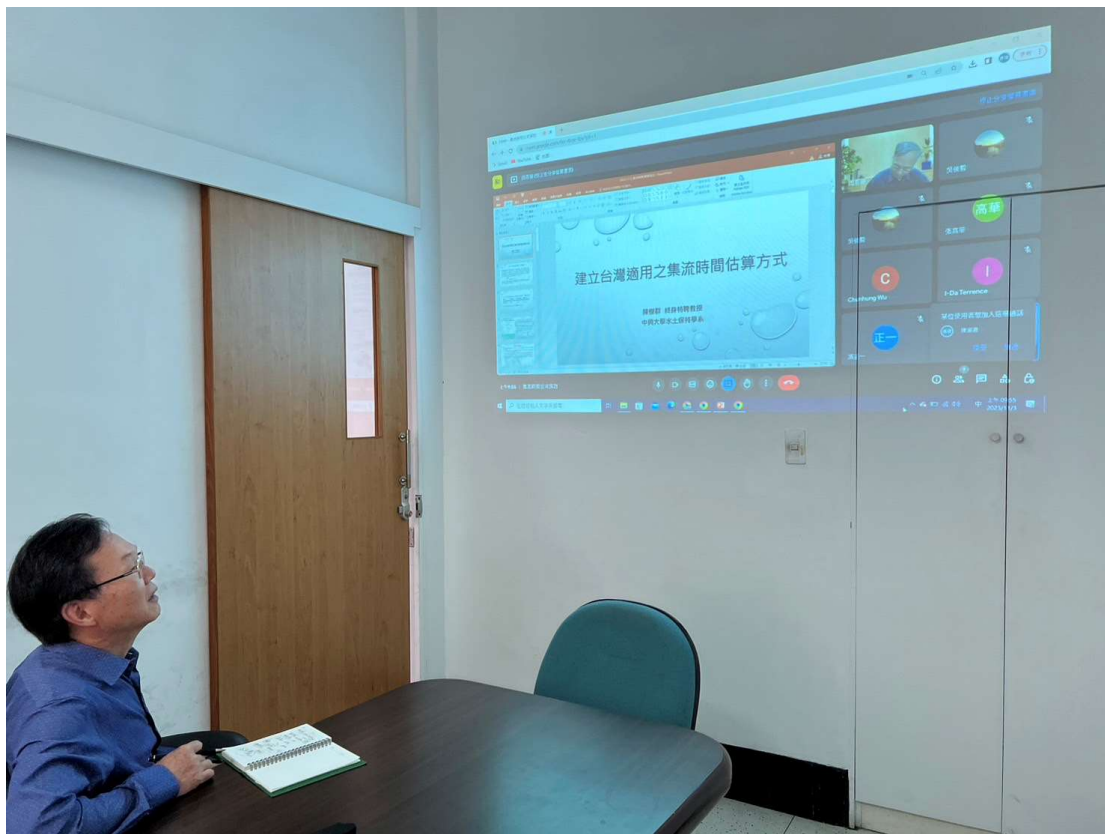


圖 6-3 本計畫召開之學者討論會照片 (2023/11/03)



## 第七章 召開技師等專業人士之說明會

技師等專業人士之說明會，於 112 年 11 月 24 日(星期五)，下午 3 點 00 分舉行。採實體與線上併存。本次會議參與者包含：陳樹群教授、鄧鳳儀理事長、郭岳樺技師、謝俊賢理事長、吳尚訓技師、吳岳霖負責人、吳正義老師、邱彥瑜博士。會議重點紀錄如下：

- 1.針對本計畫提出之集流時間方法，與會從業人員認為可以理解並且可以實施。
- 2.公式中參數的估計，建議可提出更為詳細的估算指引以免錯誤使用。
- 3.現有之技術規範應可減少指定公式，而將推薦公式資訊等，放於手冊或叢書之中，以提供技師與從業人員在選擇適用公式時的靈活性。

抄件

檔 號：  
保存年限：

國立中興大學 函

機關地址：40227臺中市南區興大路145號  
承辦人：邱彥瑜博士後研究員  
聯絡電話：[REDACTED]

(郵遞區號)

(地址)

受文者：如正、副本行文單位

發文日期：

發文字號：

類別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：

主旨：本校水土保持學系陳樹群教授為「建立台灣適用之集流時間估算方式」，分析水土保持法規第19條之適切性，特邀集相關領域學者視訊及實體召開討論會，詳如說明，請查照。

說明：

- 一、討論會日期：112年11月24日(星期五)，下午3點00分。
- 二、討論會地點：本校水土保持學系一館2樓系辦旁小會議室。
- 三、Google Meet 會議視訊連結：<https://meet.google.com/wgp-hiek-qip>。
- 四、提供出席費(含視訊)2,500元。

正本：鄧鳳儀理事長(社團法人臺北市水土保持技師公會)、郭岳樺技師(社團法人臺北市水土保持技師公會)、謝孟良技師(社團法人臺北市水土保持技師公會)、謝俊賢理事長(社團法人臺中市水土保持技師公會)、吳尚訓技師(社團法人臺中市水土保持技師公會)、陳右錚技師(社團法人臺灣省水土保持技師公會)、劉衍志負責人(致用工程技術顧問有限公司)、魏新洵負責人(豐華工程顧問股份有限公司)、吳岳霖負責人(福蘭摩沙工程顧問有限公司)、許中立教授(國立屏東科技大

圖 7-1 本計畫召開之業界討論會公文紀錄 (2023/11/24)

學水土保持學系)、吳正義兼任講師(本校水土保持學系)  
副本：

本案依分層負責規定授權單位主管決行

裝

線

第2頁 共2頁

圖 7-2 本計畫召開之業界討論會公文紀錄(續) (2023/11/24)



圖 7-3 本計畫召開之業界討論會照片 (2023/11/24)

## 第八章 結論

水土保持開發計畫多數小於 100 ha 的小集水區，故常使用合理化公式與集流時間公式來進行簡易的水文演算，因此在納入規範前，原須針對兩公式的正確性進行嚴格的審視，特別是極具爭議性的集流時間公式。為建立台灣適用之集流時間估算方式，本研究目前提出以下初步結論：

1. 本研究首先透過文獻回顧，說明集流時間之發展、幾種不同的定義，有鑑於使用運動波理論發展集流時間公式之優勢可以獲得某些理想化流域條件的解析解，本研究亦將以運動波為出發點，推導集流時間公式。即

$$t_c = \frac{n^{0.6} L^{0.6}}{I^{0.4} S^{0.3}} \quad (15)$$

2. 透過敏感度分析的結果，高降雨強度情況下，(15)式可進一步修正為(19)式，即

$$t_c = \beta \left( \frac{n^2 L^2}{S} \right)^{0.3} \quad (19)$$

3. 本研究將以室內實驗數據檢定(19)式之  $\beta$  值，目前共計有 114 場集流時間的測試。每組實驗的設計條件如表 1 所示。實驗使用了三種底面粗糙度，即鋼板(S)、覆蓋礫石表面(G)和覆蓋人工草坪表面(T)，最終得出  $\beta$  值為 0.83。



4. 透過比較不同集流時間公式與本公式之差異，Agiralioglu & Singh (1981)、Singh (1988)、Ragan & Duru (1972)，分別為本公式之 1.34、1.86 及 0.84 倍。而 Singh (1988)所估算之集流時間約為 Ragan & Duru (1972)之 2.2 倍。
5. 比較本計畫與使用原技術規範建議之流速，在高曼寧  $n$  值的情況下，小型坡面及坡度較緩處原規範將會過於高估流速、低估集流時間；在低曼寧  $n$  值的情況下，大型坡面及坡度較陡處，使用原技術規範建議之流速將嚴重於低估流速、高估集流時間。同時更凸顯，現有之技術規範無法反映  $n$  值與坡度對集流時間造成之變化。而在流速採用時亦較無依據。
6. 現以透過外國學者來訪期間，就現有成果召開交流會，並召開國內學者討論會與業界技師說明會。

## 附錄一、意見回覆

### 112 年度創新研究補助計畫-「建立台灣適用之集流時間估算方式」

#### 期末審查意見

審查意見	處理情形回覆
1. p.4-3，有「錯誤!找不到參照來源」文字，請修正。	已修正，遵照辦理。
2. p.5-12，「試驗結果與水保局第 19 條」建議修正為水土保持技術規範第 19 條。	已修正，遵照辦理。
3、4. 所提高強度降面之定義為何？文中提及將 I 予以省略，似適用於一般災害治理，於水土保持計畫設計時是否仍可予以省略？	凡以 25~50 年重現期為設計基準之規劃，在使用集流時間時均可省略 I 變數。若非上述前提，則當設計目標之降雨強度越小(如低於 2 年重現期時)，將具有誤差。
5. 其他公式部分 I 值未省略，並以 100mm/hr 代入，與本實驗之比較，是否有基礎點不同之問題？	由於其他集流時間公式具有 I 參數，在與本公式(省略 I 參數)比較時會較難明確釐清不同公式之間之集流時間估算結果之差異。故將其以 I=100mm/hr 代入以進行比較。 若考慮其他高強度降雨，如 I=120mm/hr，其他公式的係數變化約為 0.65~1.43 之間，對本計畫結論影響不大。

# 112 年度創新研究補助計畫-「建立台灣適用之集流時間估算方式」

## 期中審查意見

審查意見	處理情形回覆
1.P.1-3 表 1-1 工作執行進度之時間年度有誤，請修正。	已修正，遵照辦理。
2.p2-1 第 1、2、3 行「徑流」修正為「逕流」，其他內文仍有多處誤植處亦請一併修正。	遵照辦理。
3.P.3-1 內文「水深與流速會由集水區上游下游出流口逐漸增加」，此部分之敘述是否為「集流時間」之誤植，請再確認。	感謝委員提醒，此處文字無誤。
4.圖 4-1 之(a)、(b)兩圖內容相同(重複)其橫坐標均為坡長 L，應以曼寧摩擦係數(地表糙度)進行敏感度分析,請修正替換。	感謝委員指正，已修改圖 4-1 之 (b) 圖。
5.P4-3 之(19)式為在高降雨強度下公式，建議於公式後方標註該公式適用範圍，以免其他學者因未了解本研究推導過程而致誤用。	已於(19)、(20)式前綴文字中強調適用高強度降雨情境。
6.本研究以可調式矩形渠槽進行集流時間之室內實驗，其渠槽最大可調坡度為 12%，山坡地之坡度常高於此數值，且於公式(19)中說明地表坡度為集流時間之較高敏感因子，故試驗中高於此坡度之情況是否有其他解決方式，如 P.5-2 以調整漫地流坡面之方法解決等，並請說明室內渠槽成果於驗證集流時間之適用範圍。	受限於實驗渠槽配備，本實驗之坡度無法在增加。然據本次更新之 4-2 節結果，及圖 4-5。坡度因子為集流時間因子中較不敏感之一。
7.本案以渠槽試驗驗證集流時間公式，其模型及原型是否存在尺度問題，建議可加以探討。	由於實驗具有理論基礎，且具有與他人研究之比較，故應不具有尺度之適用性之問題。

<p>8.因應 112 年 8 月 1 日農業部農村發展及水土保持發展署組織法施行，請盤點修正本署署名，封面改制前局徽亦請併予修正為本署署徽。</p>	<p>遵照辦理。</p>
---	--------------

## 參考文獻

1. 陳樹群 (1999), 「高強度降雨之坡地集流時間公式」, 中華水土保持學報, 30(2), 103-115。
2. 陳樹群、巫仲明 (2002), 「坡地開發對集流時間影響之研究」, 中華水土保持學報, 33(2), 141-150。
3. 陳樹群、謝永能 (2008), 「集水區型態對集流時間影響之研究」, 中華水土保持學報, 39(1), 83-93。
4. 黃彥碩、楊佳寧、鄒青穎、陳樹群 (2021), 「由探源芮哈 Rziha 公式到檢視集流時間」, 中華水土保持學報, 52(3), 135-144。
5. 行政院農業委員會 (1996), 「水土保持技術規範」。
6. 王如意、簡振和、謝平城 (1991), 「以運動波方程式探討應用合理公式之合適性研究(一)試驗集水區」, 行政院農委會 80 農建-7.1-林-57(3)研究計畫報告。
7. 角屋睦、福島晟. (1976). 中小河川の洪水到達時間. 京都大学防災研究所年報, 19(B-2), 143-152.
8. Agiralioglu, N., Singh, V. P. (1981). Kinematic wave nomographs for time of concentration and lag time. Water Energy International, 38(4), 351-358.
9. Almeida, A. K., de Almeida, I. K., Guarienti, J. A., & Gabas, S. G. (2022). The time of concentration application in studies around the world: a review. Environmental Science and Pollution Research, 1-47.
10. Aron, G., Erborge, C. (1973). A practical feasibility study of flood peak abatement in urban areas, report. Sacramento, Calif: US Army Corps of Engineers.
11. Azizian, A. (2019). Comparison of salt experiments and empirical time of concentration equations. In Proceedings of the Institution of Civil

- Engineers-Water Management Vol. 172, No. 3, pp. 109-122.
12. Beven, K. J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrology Earth System Sciences*, 24(5), 2655-2670.
  13. Carter, R. (1961). Magnitude and frequency of floods in suburban areas. *US Geological Survey Professional Paper*, 424, 9-11.
  14. Chen, S. C., Wu, C. M. (1997). Kinematic Wave Model of Subsurface Flow under Hillslope. *Proceedings- national science council, Republic of China*, 21, 437-444.
  15. Chow, V. T. (1962). Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins: University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
  16. Eagleson, P. S. (1962). Unit hydrograph characteristics for sewerage areas. *Journal of the Hydraulics Division*, 88(2), 1-25.
  17. Eagleson, P. S. (1970). *Dynamic hydrology*. New York: McGraw-Hill.
  18. Eaton, T. (1954). The derivation and synthesis of the unit hydrograph when rainfall records are inadequate. *Institution of Engineers Journal (Australia)*, 26, 239-246.
  19. Gupta, V. L. S., P. J. . (1976). Time of concentration of overland flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(4), 547-553.
  20. Henderson, F., Wooding, R. (1964). Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration. *Journal of Geophysical Research*, 69(8), 1531-1540.
  21. Izzard, C. F., Hicks, W. (1946). Hydraulics of runoff from developed surfaces. Paper presented at the Proc. Highway Research Board.
  22. Johnson, S. L. S., D. M. (1973). Effects of urbanization on floods in the Houston, Texas metropolitan area. *Water-Resources Investigations Report*, 3, 73.
  23. Johnstone, D., Cross, W. P. (1949). *Elements of applied hydrology*:

Ronald Press Co.

24. Kerby, W. (1959). Time of concentration for overland flow. Civil engineering, 29, 60.
25. Kibler, D. F., and Aron, G. (1983). “Evaluation of Tc methods for urban watersheds.” Frontiers in Hydr. Engrg.: Proc., Cambridge Conf., H. T. Shen, ed., ASCE, New York, 553–558.
26. Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil engineering, 10(6), 362.
27. Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous areas transactions. Am Soc Civil Eng 20:1–56.
28. Linsley, R., Kohler, M. A., Paulhus, J. (1982). Hydrology for Engineers: McGraw--Hill, Inc.
29. McCuen RH (2009) Uncertainty analyses of watershed time parameters. J Hydrol Eng 14(5):490–498.
30. McCuen, R. H., Wong, S. L., Rawls, W. J. (1987). Estimating urban time of concentration. Journal of hydraulic Engineering, 110(7), 887-904.
31. Mockus, V. (1957). Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application.
32. Morgali, J. R., Linsley, R. K. (1965). Computer analysis of overland flow. Journal of the Hydraulics Division, 91(3), 81-100.
33. Mulvaney TJ (1850) On the use of self registering rain and flood gauges. Inst Civ Eng Proc 4:1–8
34. Nicklow, J. W., Boulos, P. F., Muleta, M. K. (2004). Comprehensive sewer collection systems analysis handbook for engineers and planners: MWH Soft, Incorporated.
35. Overton, D. E., and Meadows, M. E. (1976). Stormwater modeling, Academic Press, New York.
36. Ragan, R. M., Duru, J. O. (1972). Kinematic wave nomograph for

- times of concentration. Journal of the Hydraulics Division, 98(10), 1765-1771.
37. Reich, B. M. (1962). Soil conservation service design hydrographs (Vol. 1962).
  38. Singh, V. (2001). Kinematic wave modelling in water resources: a historical perspective. Hydrological processes, 15(4), 671-706.
  39. Singh, V. P. (1976). Derivation of time of concentration. Journal of hydrology, 30(1-2), 147-165.
  40. Singh, V. P. (1988). Hydrologic systems. Volume I: Rainfall-runoff modeling. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
  41. Stephenson, D. (1981). Stormwater hydrology and drainage, Elsevier, New York
  42. Watts, S., Chow, L., Ostrow, R., Faras, A., Broker, T. J. P. M. (1985). Localization of HPV-5 transforming functions.
  43. Williams, G. B. (1922). Flood discharges and the dimensions of spillways in India. Engineering, 134(9), 321-322.
  44. Yen, B. C. (1982). Some measures for evaluation and comparison of simulated models. Urban Stormwater Hydr. and Hydrology: Proc., 2nd Int. Conf. on Urban Storm Drainage, B. C. Yen, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colo., 341-349.