

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 生活與應用科學科

040805

以水筒模式建立水資源管理預測系統

學校名稱：國立馬祖高級中學

作者：	指導老師：
高一 陳文茜	李 中
高二 莊連安	胡裕仁
高一 胡安廷	

關鍵詞：水土保持、筒狀模式、預警系統

摘要

本研究提出以筒狀模式，計算台灣中部 2006 至 2009 年間 29 場崩塌地及 17 場土石流案例。實驗分析以第(一)(二)(三)筒水深及土壤雨量指數(SRI)，及水土保持局土石流累積雨量警戒基準值之方法涵蓋案例百分比計算警戒基準值。

研究顯示土石流 RTI1 及 RTI2 值較崩塌地高 80%及 25%，此與土石流發生需有大量降雨有關，而崩塌地 RTI1 值偏低，RTI2、RTI3 及 RTI4 值則較土石流案例接近，乃因崩塌地發生於土層含水量達一定程度時，將由涵蓋 90%案例 RTI 值顯示，RTI2 及 RTI3 仍合理，RTI1 及 RTI4 則低於 200，該兩項對於災害警戒應用性較低，後續依涵蓋案例 90%、50%、30%、10%。

一、前言

研究動機(Introduction)

近年來引發多起崩塌及土石流事件，幾場事件並非颱風或豪雨所造成之天然災害，尤其 2011/02/20 基隆連日下雨，造成土石鬆動，引發走山事件，該事件並非颱風或豪雨所造成之天然災害，我們希望藉由這次的研究來了解土砂災害的情況。其中，地文因子是土石流發生的「空間」條件；水文因子則是土石流發生的「時間」條件，兩者之間常有因果關係，以提高災害預警及疏散避難發不時機之精度，進而降低生命財產損失。

並由相關研究得知，要使土石流發生必須達到「足夠的土石」、「適當的坡度」與「充足的水」等三個要素。其中，地文因子是土石流發生的「空間」條件；水文因子則是土石流發生的「時間」條件，兩者之間常有因果關係，因此本研究導入據邊坡土層概念之筒狀模式進行分析。

二、文獻回顧(Literature Reviews)

(一)土砂災害相關研究

1. 土石流

大雨過後的山區，因為大量雨水滲入地下後，水份浸泡軟化地下的泥土，使其具有流動性，而大量黏稠的泥漿受重力的作用時，會順著地勢向下坡低窪處流動，因流動時的推力很大，使得大石塊也跟著被推動，形成所謂的土石流。

(1)充足的土砂料源

足夠的土石材料乃形成土石流的必要條件，而集水區的土石主要來源有四種：

- A. 原有溪床堆積層的沖刷破壞。
- B. 河岸沖刷。
- C. 上游邊坡的崩塌。
- D. 壩體崩塌。

(2)適當的溪床坡度

許多研究顯示土石流的發生與坡度有密切的關係，當坡度平緩時即使堆積物再多也不易產生土石流，因此常以坡度設定土石流發生的臨界條件。其中以 Takahasi (1978) 所推導的公式最常被採用：

$$\tan\theta = \frac{C_*(\sigma - \rho)}{C_*(\sigma - \rho) + \rho(1 + \frac{h_0}{d})} \tan\phi \quad (1)$$

θ 為溪床坡度 (度)

C_* 為堆積層砂礫容積濃度 (%)

σ 為砂礫密度 (Kg/m^3)

ρ 為水之密度 (Kg/m^3)

ϕ 為堆積層的內摩擦角 (度)

h_0 為土石流發生時表面流動的水深 (cm)

d 為土砂平均粒徑 (cm)

Takahasi (1977) 以靜力平衡的觀點在不考慮黏土黏滯性的情況下，推導清水流經一砂粒堆積層時可能形成土石流的臨界角度。其結果發現隨著水流深度及砂粒平均粒徑的不同，將形成五種運動形態 (見圖 2) 而其中 IV 的區域為土石流的發生狀態。

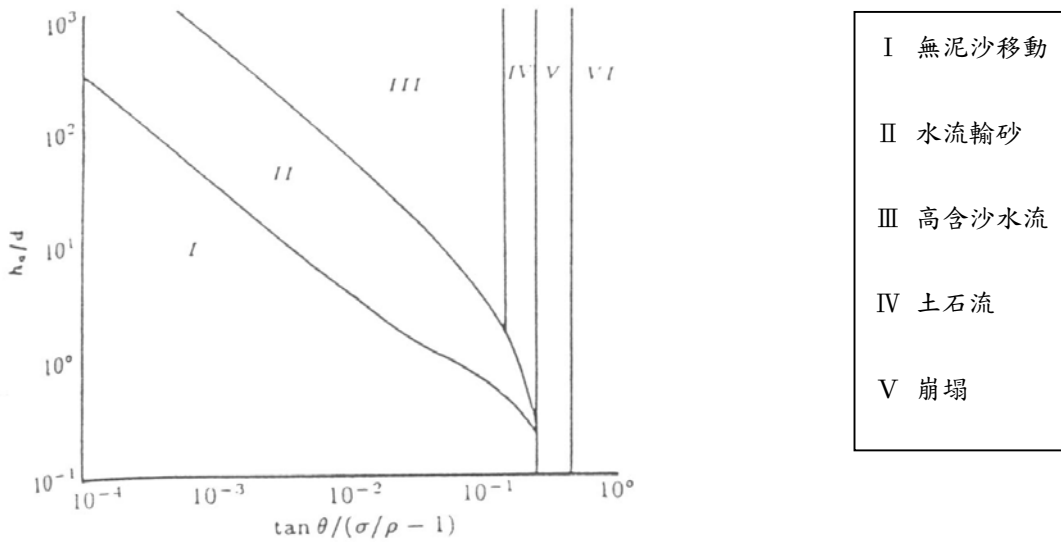


圖 1 土石流運動型態(Takahasi, 1978)

他假設土石流發生所需的臨界坡度 θ ，應介於最小臨界角度 θ_1 與最大可能發生角度 θ_2 之間，推導其結果可得下面公式：

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$$

$$\tan \theta_1 = \frac{C_*(\sigma - \rho)}{C_*(\sigma - \rho) + 2\rho} \tan \phi \quad (2)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{C_*(\sigma - \rho)}{C_*(\sigma - \rho) + \rho} \tan \phi \quad (3)$$

一般而言，土石流的 $C_* \doteq 0.7$ ， $\phi \doteq 35$ 度， $\sigma \doteq 2650(\text{kg}/\text{m}^3)$ ， $\rho \doteq 1000(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，則土石流最大可能發生角度 (θ_2) 為 21 度以上，最小角度為 15 度。謝正倫等 (1992, 1993) 曾針對花東地區的土石流危險溪谷進行調查，發現危險溪谷所在坡度約在 10 度至 25 度間，與計算結果相去不大，並發現在坡度 10 度以下的地區無土石流發生，因此推論發生土石流的溪床，其坡度應在 10 度以上。

劉格非 (1997) 更明確指出土石流在坡度 6 度以下的平原會開始減速堆積，並在 2 度的地方停止，因此坡度 2 度~6 度的溪床應為土石流的堆積區。而 6 度~15 度的斜坡則為土石流的流動區，在流動區內移動的大石會因前端堆積大石的阻擋而停止，再因後面大石的撞擊而前進，因而呈現波段狀。15 度~25 度為土石流的發生區，亦為坡地崩塌物質堆積的地方。(圖 3)

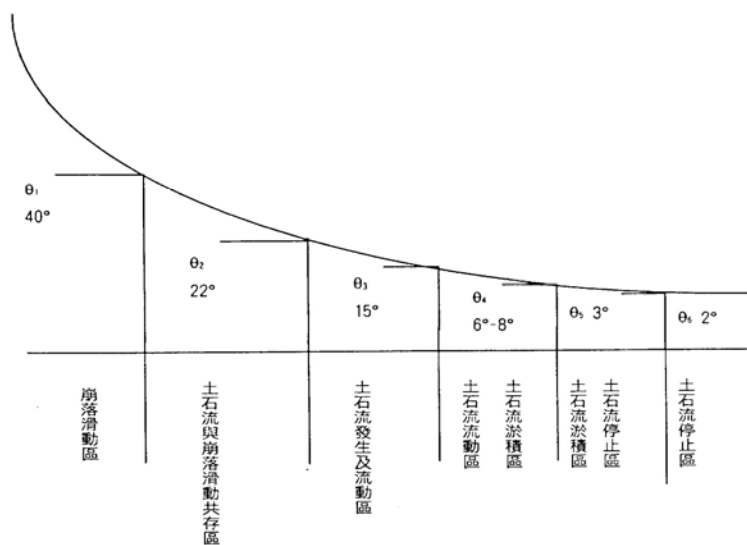


圖 2 土石流流動與坡度關係 (施邦築、謝正倫, 1998)

3、充足的水量：

水是土石流發生不可或缺的元素，土石流常發生於颱風期間，由於颱風豪雨的雨量豐沛且降雨強度大，大量的雨水沖蝕地表並入滲岩層，順著不連續面產生側向及上舉水壓力，破壞邊坡物質，造成邊坡型土石流；大量雨水也可能進入溪床堆積層，擾動土石，形成大規模的溪床型

土石流。就水的供應狀況，我們可以針對降雨本身和集水區特性分別加以討論。

A. 降雨因素：

有關降雨因素的研究乃以降雨強度、降雨延時和累積雨量為主，並以降雨狀態作為土石流發生與否的簡易判定標準。有關的研究結論整理如下：

(A) 降雨強度與降雨延時

a. Caine (1980) 提出土石流發生的臨界公式：

$$I \geq 14.82T^{-0.39} \quad (4)$$

其中， I (mm/hr) 為降雨強度， T (hr) 為降雨延時。

b. Cannon 和 Ellen (1985) 分析美國加州舊金山灣的降雨資料，並以有效雨量推求土石流發生的臨界公式。其中有效降雨量為 $(I - I_0)$ ， I_0 則為雨水降到地表後因蒸散、截留、窪蓄等所造成的流失，其土石流的發生條件為：

$$(I - 6.86)T \geq 38.1 \quad (5)$$

其中 I 為降雨強度，而 6.86 為降雨流失 (I_0) ，38.1 為臨界水量 (Q_c) 。

c. 江永哲、林啟源 (1991) 以台灣地區的資料套入計算，發現在降雨延時 30 小時所得的曲線與 Cannon 和 Ellen (1985) 所發表的公式類似，但延時若超過 30 小時，則與 Caine (1980) 所提出的公式較吻合。

(B) 累積雨量與降雨強度

另一種方式為藉由土石流發生前後的雨量資料，去計算有效累積雨量，然後建立土石流發生的臨界模式，一般以下列關係式來表示：

$$I = aR + b \quad (6)$$

其中 I 為有效降雨強度 (mm/hr)， a 、 b 為當地環境的經驗係數， R 為累積雨量 (mm)。江永哲、林啟源 (1991) 曾對台灣幾處土石流發生區進行研究，歸納出其關係式：新竹芎林： $y = (-16.3)x + 519$ ；南投豐丘： $y = (-179)x + 3577$ ；花蓮銅門： $y = (-60.3)x + 1419$ 等 (y 為有效雨量， x 為有效雨量強度)，並就台灣一般地區推論，當累積雨量

150mm 以上或降雨強度 40mm/hr 以上時，容易發生土石流。

B. 集水區因素：

集水區的大小影響匯聚雨量的多寡，謝正倫等（1992）對花蓮土石流的調查發現，在河道平均坡度大於某特定角度的集水區面積，也可作為評定土石流發生可能性的指標。其研究結果顯示土石流發生溪流的集水面積主要分佈在 10~120 公頃之間，以 50~60 公頃左右最多，而 10 公頃以下集水面積幾乎沒有土石流發生，但是他在考慮坡度因子（土石流主要發生於坡度 10 度以上的地區，而該區 10 度以上的集水面積皆大於 5 公頃）之後，將 5 公頃訂為土石流發生的最小集水區範圍。

2. 崩塌地

崩塌指物體沿邊坡近乎垂直的掉落。

台灣因激烈之地殼運動，致地質破碎，地層傾斜，並形成陡峻之地形，為崩塌之主因，再加上豪雨集中及溪流切割之誘因，即使人煙罕至之山地，亦經常發生大規模之崩塌

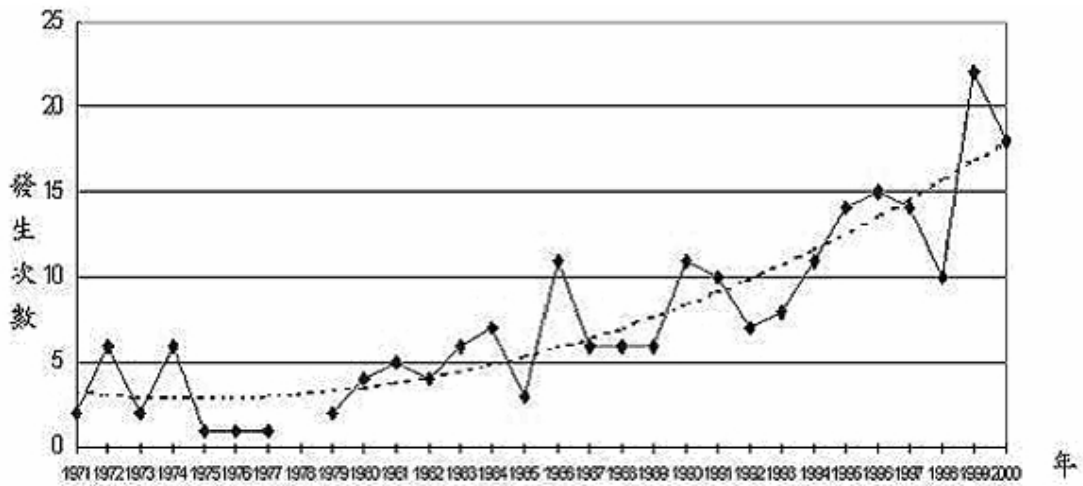
此等自然崩塌在台灣高山地區相當普遍，而國有林班地所佔面積 170 餘萬公頃之範圍內，更多屬坡度陡峻，其自然崩塌之嚴重性更可想而知。

(1) 次數

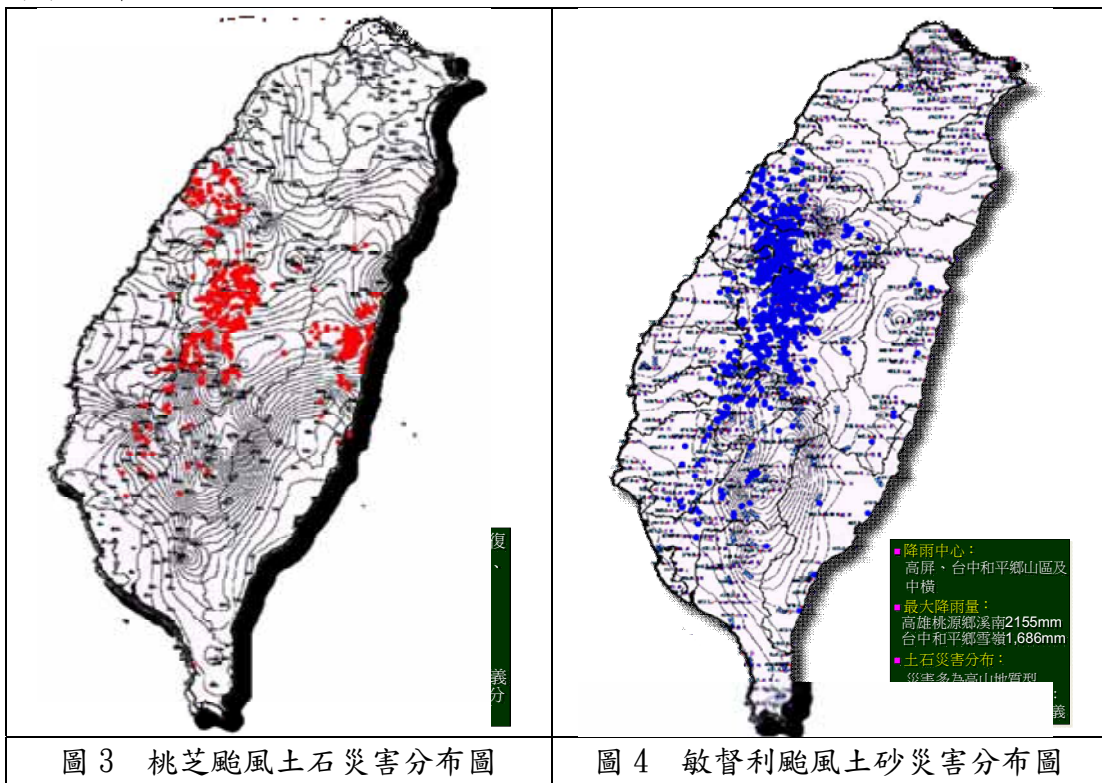
A. 發生次數與時間呈現高相關。時間趨勢，似乎提醒我們必須謹慎處理未來可能持續增加的崩塌災害。

B. 尤其 1990 以後崩塌災害的發生次數快速增加，已較之前次數增加一倍以上，至 1999 年更竄升至 20 次以上。

C. 多發生於夏季 7-9 三個月，合佔全年比例的 64%。



(2) 分布



(3) 頻率

- A. 台北縣為崩塌災害最嚴重區，佔 20%。
- B. 次為南投、花蓮、宜蘭三縣，合佔 31%。
- C. 空間轉移：1971-1990 年，除台北縣外，以台中縣、基隆市和新竹縣為崩塌災害多發生縣市，但 1990- 2000 年則轉為南投、花蓮、宜蘭三縣。
- D. 過去無明顯崩塌災情的縣市，近十年逐漸成為崩塌災害的易發生區，不得不謹慎提防。

(二)筒狀模式

筒狀模式(tank model)為 40 年前日本國立防災科學技術中心（現在的獨立行政法人防災科學技術研究所）為了預測雨水所形成的河川水位，而做成因降雨而隨著時間的延遲流入河川的模式原型，如圖五所示。筒狀模式降雨量與逕流量之關係可以下式褶合積分表示：

$$q(t) = \int_0^{\infty} R(t-\tau)k(\tau)d\tau \quad (7)$$

式中 $q(t)$ 為逕流量、 $R(t-\tau)$ 為降雨量、 $k(\tau)$ 為核心函數，亦即單位有效雨量所對應之流出波形。

由於筒狀模式於 WMO 水文委員會主辦的水位預測模式中獲得優秀成果，且在預測河川水位上具有良好推估功能；以及筒狀模式可適用於數 ha 到數十 km^2 的集水區進行洪峰流量推估(岡田憲治，2002)。因此相較於合理化公式，更適用於台灣地區各類型集水區之洪峰流量推估。

如圖五所示，第 1 筒水筒可視為地表及表層土壤之含水量，第 2 筒可視為中段土層之含水量，第 3 筒可視為深層土層之含水量，在單場降雨時，各層水筒內的運動行為如下列 4 點假設情形：

- (1)降雨後，雨水從第 1 筒、第 2 筒至第 3 筒依序移動，運移時間以 1 小時為單元計算。
- (2)各筒移動量與各筒內貯留高度（=貯留量÷底面積）呈比例關係。因此只要考量各筒貯留高度即可，而不需考量集水區面積的大小。
- (3)當各筒的貯留高度超過 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 後，即從側向橫孔流出，形成逕流。
- (4)雨水最後由第 3 筒的底孔運移至地下水水層。

由上列假設條件中，當降雨發生後，全部雨水由第一筒流至第三筒後，由地表逕流及地下水完全流出土層至少需要 10 天，因此正確估算筒狀模式，首先需要 2 週以上的前期降雨資料。

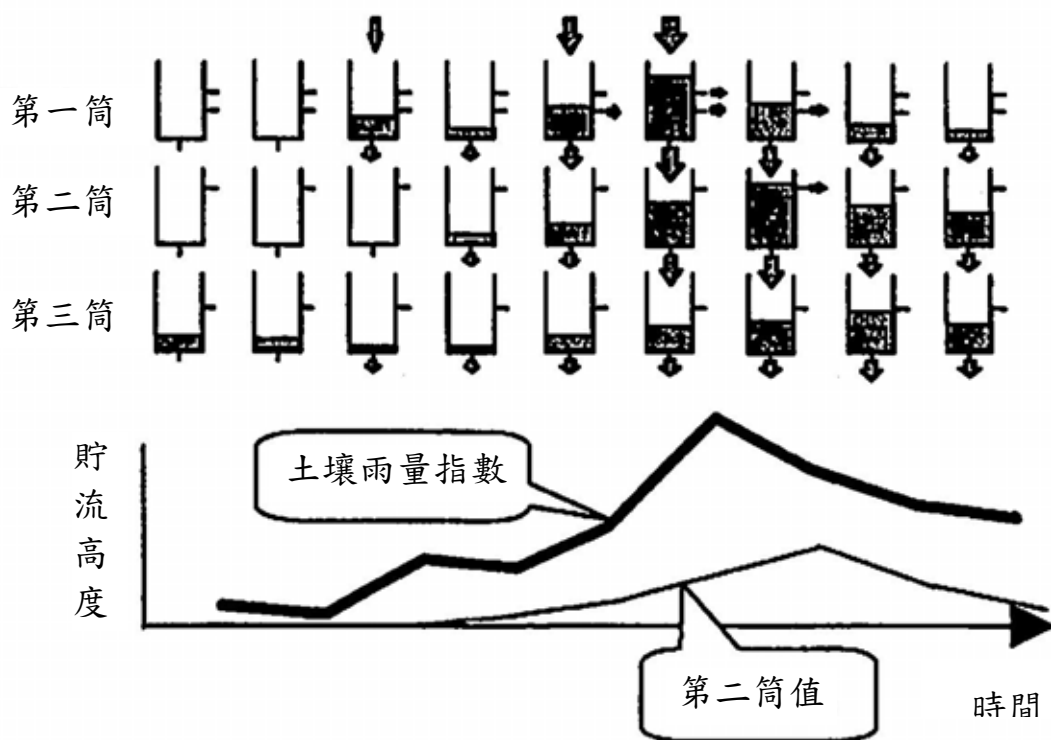


圖 5 筒狀模式示意圖

筒狀模式各參數乃因地質不同，而有不同參數，根據日本 Yasuo and Shigeki(1979)劃分數個小集水區，採用筒狀模式推求整個集水區流量，並建立筒狀模式於各地質種類之參數，如表 1 所示，各參數符號對應圖 6。根據 1990 年日本氣象廳預報部預報課用自動氣象數據探測系統(AMEDAS)及一定的探測率(80%)進行全國驗證時發現，使用花崗岩的地質參數，和其他地質參數的應驗率差異只在幾個百分點而已(岡田憲治，2002)。因此為能符合本年度計畫目的及合約要求，本研究採用日本花崗岩參數進行後續分析。

表 1 日本筒狀模式各參數列表(Yasuo and Shigeki, 1979)

地質種類	L_1	L_2	L_3	L_4	R_1	R_2	R_3	R_4	F_1	F_2	F_3
火山岩	30-40	60-75	15	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.08	0.01
花崗岩	15	60	15	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.05	0.01
古生代	30	75	5	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01
第四紀	15	40	5	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01

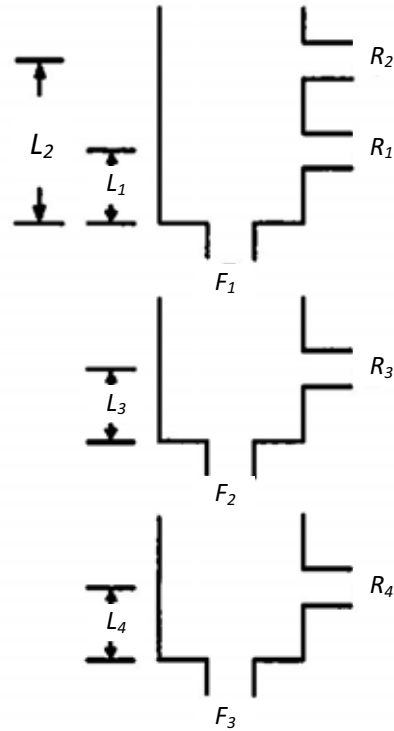


圖 6 直列三段水筒模式

台灣地區亦有學者針對筒狀模式原理進行研究，畢嵐杰(2004)以建構一套地表及地表下降雨—逕流模式之水文歷程為主。其中建構地表下逕流模式，係以二個直列式水筒模式為架構，分別模擬中間流及地下水流，此兩部分水流之總和即為地表下逕流量。研究發現各筒間皆以線性水庫及水文連續方程式控制流入與流出量之機制。且將逕流機制合理地劃分為地表、中間流及地下水逕流 3 個次逕流分量，且由於考慮地表下逕流機制，使得對於集水區逕流歷線之退水段模擬更為精確，改善過去水文模式高估初始歷線與低估最終歷線之現象，經以合坑溪集水區為模擬研究試區，證實其具有良好之精確度，可更真實地呈現逕流歷線之原貌。

李光敦等(2007)採用土壤水份指數 Φ 指數入滲法推求降雨事件之有效降雨組體圖與直接逕流歷線；而後選用系統內建之運動波-地貌瞬時單位歷線模式、三角形單位歷線法、線性水庫模式、無因次單位歷線與水筒模式等五種降雨逕流模式，配合「地文因子」與「地表覆蓋分類」之分析結果，以進行次集水區之降雨逕流模擬。

除此之外，陳樹群(1984)針對地下水內吸附性污染物傳輸進行模擬，該研究係以雙筒狀模式進行模擬並以若干組實驗進行比對，研究結果顯示，雙

筒狀模式所需檢定參數較少，僅需藉由流入量與流出量資料即可驗證，對於資料缺乏的地區具有實用及簡便之特性。該研究亦發現實驗與筒狀模式模擬結果相比較，證明模式針對地下水污染物傳輸能力具有良好模擬效果。

中國大陸方面，王光謙、劉家宏等學者於 2004 年為有效模擬流域內降雨-逕流及產沙輸沙過程，以達成流域防汛減災、水量調度、水土保持等目的，建立數值流域模型概念。此方法乃以 DEM 資料作為基礎，分析流域內各集水區坡度、坡向、集流時間及遞移率等資訊，並配合衛星影像分析地表土壤類型、土地利用類型及植生覆蓋等資料，建立降雨-逕流模式、逕流-流量歷線、產沙量-逕流-輸沙量等模式，再者建立流量收支圖進行演算，模擬各期降雨與黃河流域水量及輸沙量關係，進而提供黃河流域管理參考。其中降雨-逕流部分是以筒狀模式概念進行計算，如圖 7 所示。

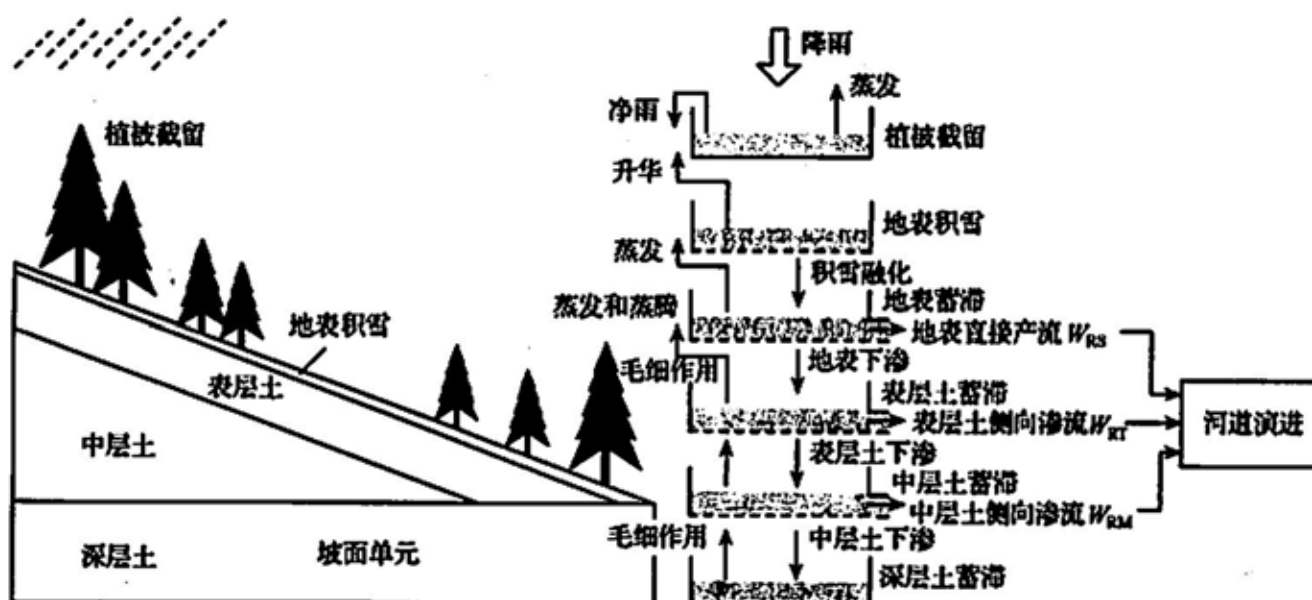


圖 7 流域坡面的垂直結構圖

(三) 土壤雨量指數

土壤雨量指數係指「雨量」=「土壤中的貯留量」+「流入河川的水量」概念，如圖 8 所示，單場降雨事件發生時，除了地表逕流及表層土壤滲出補注河川水位，其餘雨量貯留於土層內，此部份即為筒狀模式中 3 個筒之水深值，因此日本定義 3 個筒水深值總和即為「土壤雨量指數」。

根據日本研究土砂災害方面，發現集水區內的坡面會因各地質條件的不同，而造成發生破壞的時間不同。最大降雨強度的發生時間和坡面破壞的發生時間並非相同。事實上，降雨強度最大的時間，反而發生破壞的情況較少，

大多是在最大降雨強度發生之數小時後，即當土壤雨量指數值到達峰值後才發生破壞。主要是因雨水滲透到基岩附近後，進而引起剝離的所需時間，會因坡面地質條件而異。因此以集水區來看，最危險時間區段時為土壤雨量指數超過臨界值，且第2筒到達峰值為止。尤其是突破歷史最大降雨量時，至第2筒的峰值的期間，是最危險的時間區段。(岡田憲治，2002)。

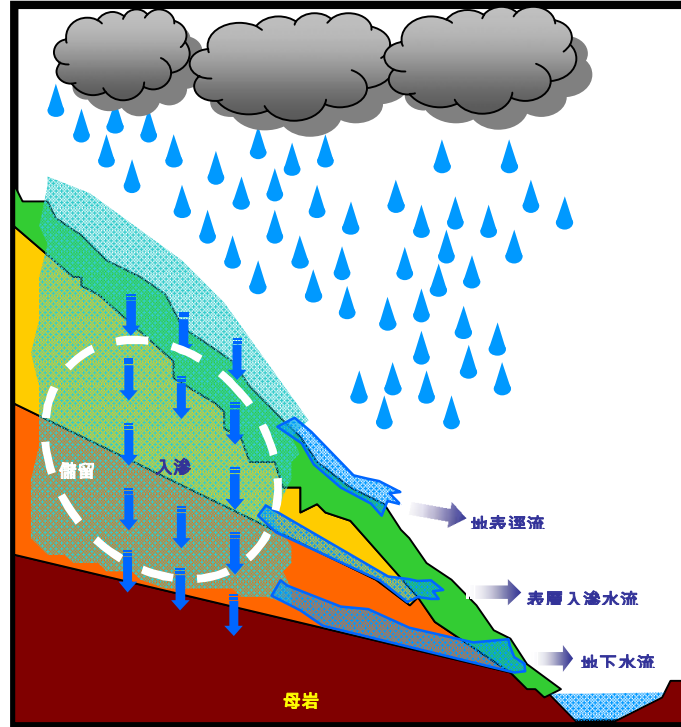


圖 8 土壤雨量指數示意圖

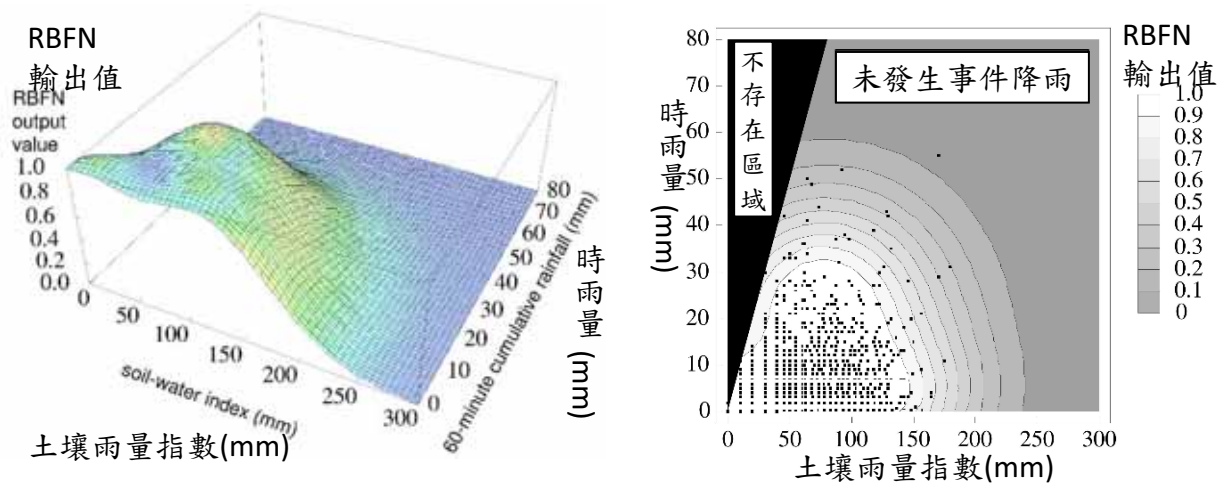


圖 9 降雨強度、土壤雨量指數與 RBFN 輸出圖(Nobutomo OSANAI，2010)

根據鈴木等人(1979)採用筒狀模式對六甲山的進行驗證，發現第1筒與第2筒的貯留量峰值，最接近發生破壞的時間。京都大學防災研究所(柴田等人，1984)用濱田測候站的自動氣象數據探測系統(AMEDAS)雨量，重

現 1983 年 7 月山陰豪雨（罹難者、失蹤者 112 名），與濱田市附近所發生的破壞件數的關係後呈現出，97%破壞案例發生在筒狀模式中 3 個水筒的總貯留量(即為土壤雨量指數)在 125mm 以上區間。Nobutomo OSANAI 等人(2010)亦採用筒狀模式及土壤雨量指數作為基礎架構(圖 9)，並以 RBF network 法建立日本山坡地危險度指標，圖中 RBFN 值越低代表危險度較高，再者依歷史災害發生雨量建立新 CL(Critical Line)線如圖 10，研究結果顯示比圖 11，日本常用土砂災害發生危險基準線較精準，降低疏散時機判定錯誤率。

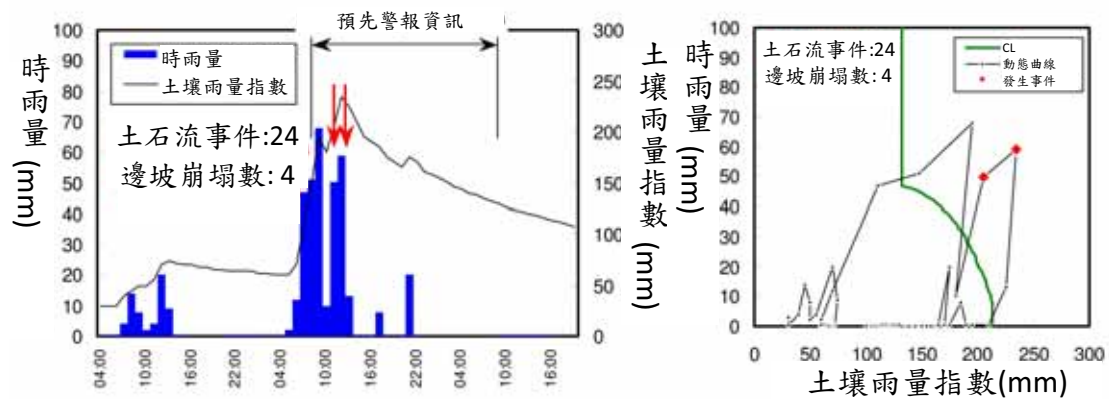


圖 10 動態曲線與新 CL 線圖

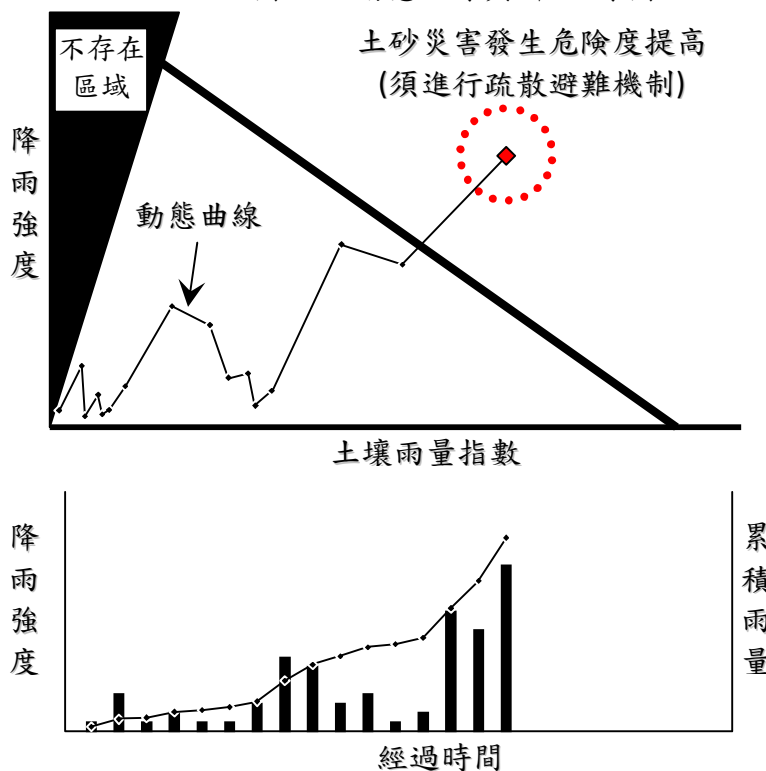


圖 11 土砂災害發生危險基準線圖

(四)土砂災害警戒基準值(RTI 值)

水保局依據 93.12.3 通過之「土石流防災疏散避難作業規定」，第四條第三項第一款「發布時機」內容：行政院農業委員會水土保持局應訂定並公開各地區土石流警戒基準。為落實「土石流防災疏散避難作業規定」之相關規定，並且在當地民眾易於了解及地方防救災單位易於使用之考量下，水保局從 94 年開始將所訂定之各鄉鎮區土石流發生降雨警戒基準值簡化為土石流警戒基準值，以作為在颱風豪雨期間地方單位無法取得連繫，或是局部地區降雨量大時，地方防救災單位自行發佈土石流警戒並進行疏散避難之參考依據。土石流警戒基準值之計算方法說明如下：

$$RTI = I \times R_t \quad (8)$$

$$R_t = R_0 + P = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (9)$$

式中 R_t 為有效累積雨量

I 為某時刻降雨強度

R_0 為降雨開始至土石流發生時開之累積雨量

P 為前期降雨

R_i 為土石流發生前 i 日之日雨量

α 為土壤含水量遞減指數，取 0.8

在降雨強度 $I=10$ mm/hr 的情況下，將各鄉鎮區之 RTI 降雨警戒基準值除上 10 mm/hr 簡化為土石流警戒基準值 R_t 。水保局為了方便應用，土石流警戒基準值以 50mm 為 1 級距，該級距前後 25mm 為各地應用上之彈性調整區間。

由於筒狀模式之土壤雨量指數可視為水分在土層中量體，因此水保局(2010)之筒狀模式結合土壤水份指數建構坡地土砂災害警戒機制研究中，將原有 RTI 公式中 R_t 有效累積雨量改為土壤雨量指數(SRI)，並將原有 I 降雨強度分別以第一筒水深(H_1)、第二筒水深(H_2)及第三筒水深(H_3)代入，如此可得到不同土石流發生降雨驅動指標 RTI 值，如下式所示。本研究依循該篇研究而進行案例分析。

$$RTI_1 = I \times SRI \quad (10)$$

$$RTI_2 = H_1 \times SRI \quad (11)$$

$$RTI_3 = H_2 \times SRI \quad (12)$$

$$RTI_4 = H_3 \times SRI \quad (13)$$

式中 SRI 土壤雨量指數(mm)，I 為土石流發生時刻之時雨量(mm)， H_1 為土石流發生時刻之第一筒水深(mm)， H_2 為土石流發生時刻之第二筒水深(mm)， H_3 為土石流發生時刻之第三筒水深(mm)。

三、研究方法或過程(Materials and Methods)

(一)研究方法

1. 災害案例分析

首先收集水土保持局土石流防災資訊網之 95 至 98 年中部地區重大土石流災害案例，包括 17 場土石流案例及 29 場崩塌地案例，共計 46 筆，以地理資訊系統(ArcGIS)分析各案例基本資料；再收集各案例鄰近中央氣象局雨量站之災害發生時刻前 10 日至後 3 日之時雨量資料，進行筒狀模式分析，獲得土砂災害發生時刻之降雨量、第一筒水深、第二筒水深、第三筒水深，及三筒總和的土壤雨量指數，繪製降雨量—土壤雨量指數、第一筒水深—土壤雨量指數、第二筒水深—土壤雨量指數、第三筒水深—土壤雨量指數等分布圖，再依土石流與崩塌地案例數量，各別計算案例事件涵蓋百分比並內插求得四種 RTI 值，依照方程式(10)~(13)，繪製土砂災害發生危險基準線，並採用水土保持局現行以降雨強度 $I=10$ mm/hr 的情況下，將決定土壤雨量指數(SRI)值作為警戒基準值，本研究畫定流程如圖 12 所示。

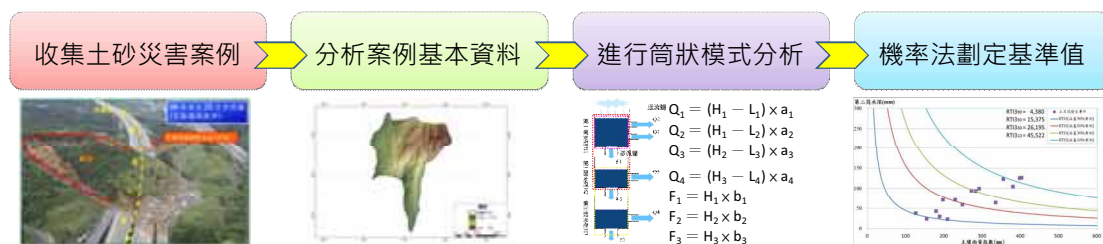


圖 12 本研究劃定災害警戒基準值流程图

2. 筒狀模式概念流速分析

本研究為推求筒狀模式之各流出孔之流出比，於真實條件下，各雨量筒所需流出孔徑大小，因此本研究便以(14)式流體力學之流速方程式進行推估，以做為後續設計雨量筒之參考。

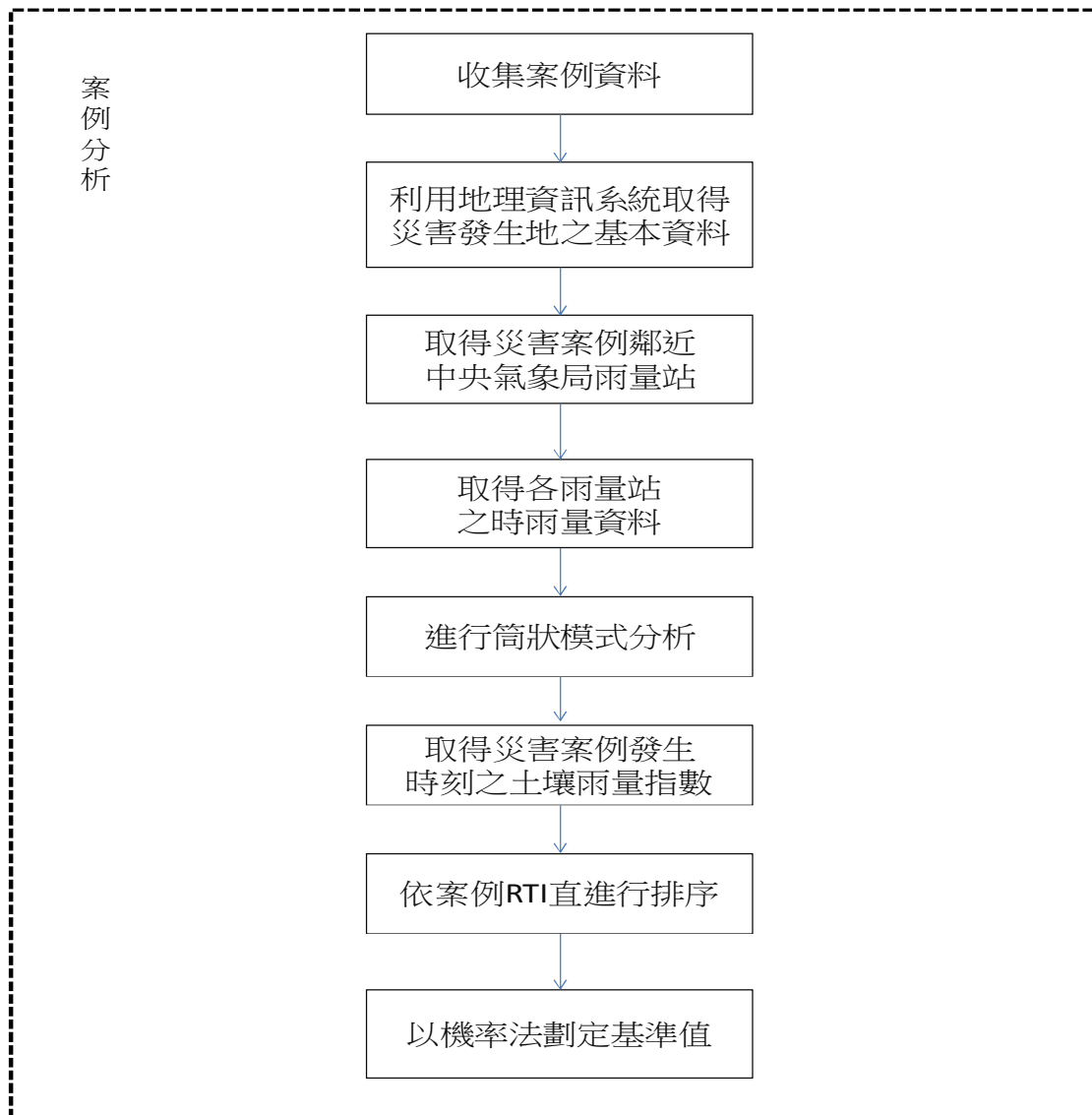
$$V=\sqrt{gh} \quad (14)$$

方程式中 g 為重力， h 為水深， V 為流速

3. 筒狀模式各層筒孔徑率定

由實驗直接取得筒狀模式之各流出孔之流出比，以求得真實條件下各雨量筒所需孔徑大小，以做為後續設計雨量筒之參考。

(二)研究架構圖



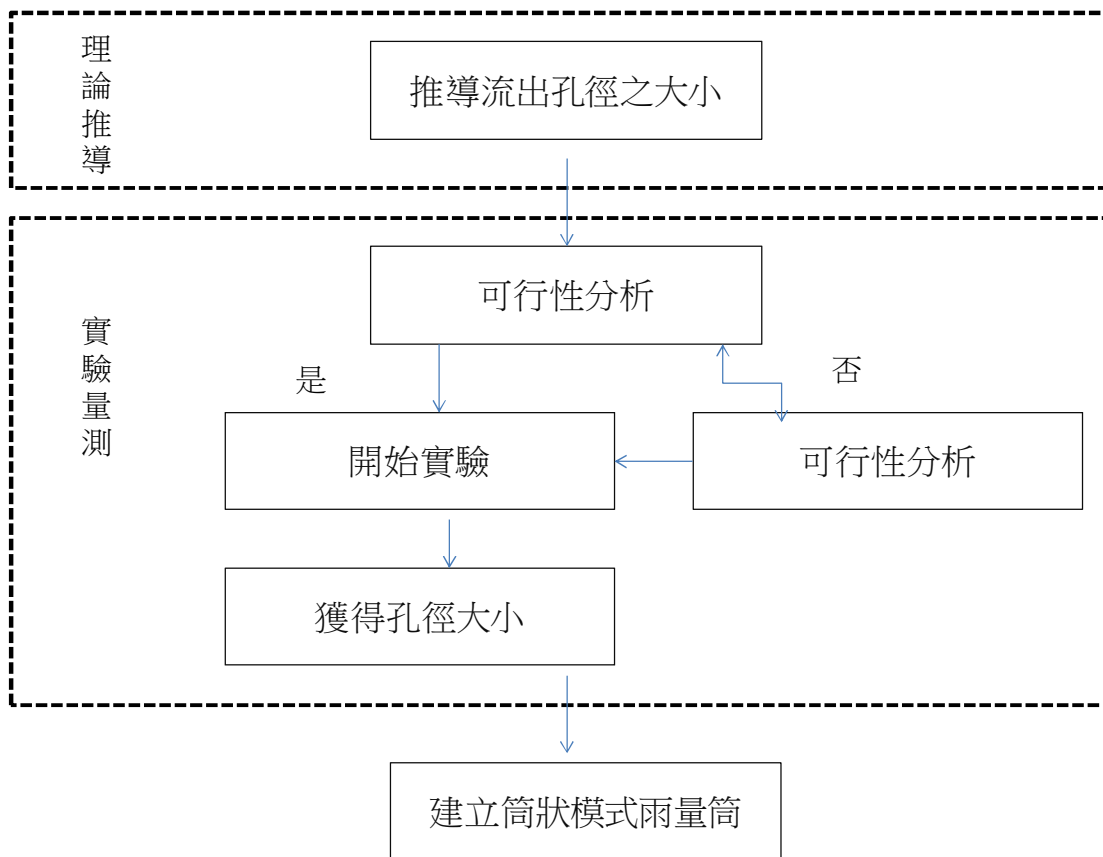


圖 13 研究架構圖

(三) 實驗步驟

1. 筒狀模式概念雨量筒

使用醫療器材輸液套進行實驗，先將輸液套導入針切除，再將調節螺鬆開，將管內空氣排除後關緊調節螺，再調整調節螺之位置，使流出量符合筒狀模式各流出孔之流出比。

2. 家用筒狀模式雨量筒

先在家中挑選出適合的容器，例如：喝完的汽水瓶、圓滑的寶特瓶，將其裁切成同一平面底部的適當大小圓筒，在套上保鮮袋，用橡皮筋網實，再網上量尺後放至於實驗台上，並選取適合的穿孔材料，一一穿孔試驗，例如：圖釘、從最細到最粗之縫針，放妥後始加水至 10cm，以每五分鐘去記錄其水深，並拍照，觀測 1hr 後，將其資料記錄輸至 EXCEL 來分析，計算水深和流速兩項變化方程式，來判斷其接近筒狀模式哪一孔之流出比。

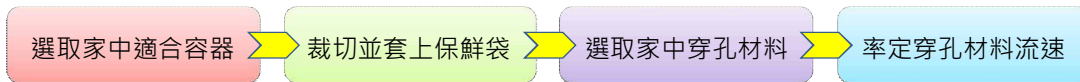


圖 14 家用雨量筒實驗流程圖



圖 15 家用雨量筒實驗器材及步驟說明圖

(四) 試驗流程圖

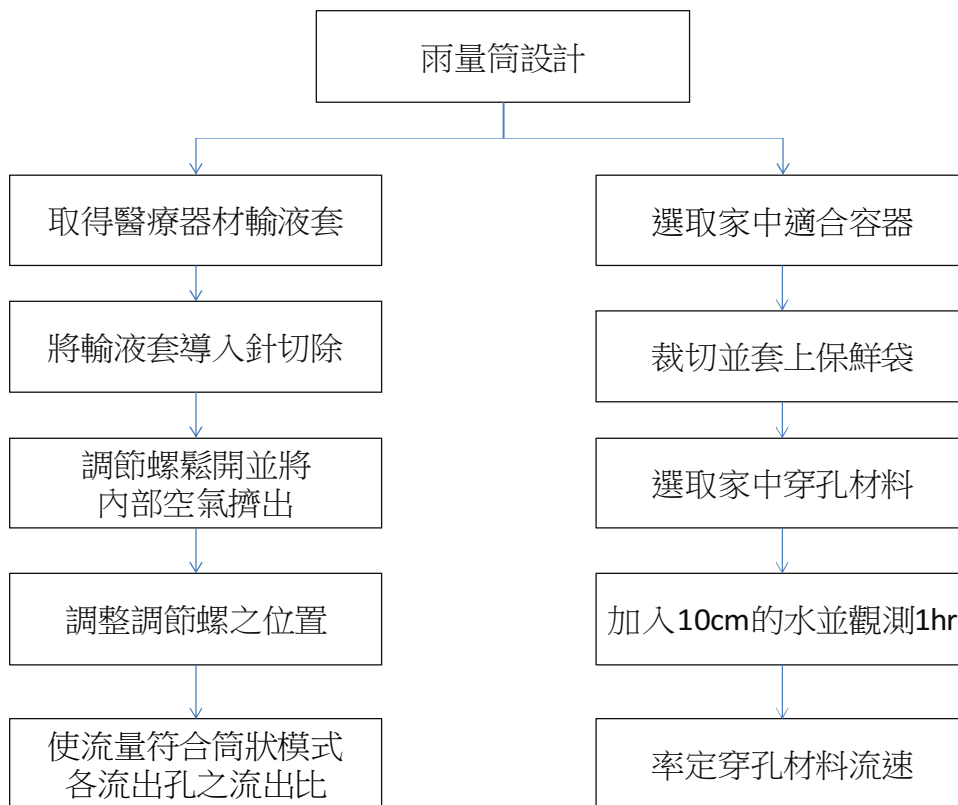


圖 16 試驗流程圖

四、實驗結果與討論(Results and Discussion)

(一)警戒基準值劃定

1. 土石流

(1) 案例基本資料

本研究採用水土保持局土石流防災資訊網之96年至99年中部地區土石流案例17場進行分析，各案例基本資料如表2所示。

表2 土石流案例基本資料

編號	行政區域	平均坡度(%)	鄰近雨量站1	鄰近雨量站2
DF95001	南投縣—水里鄉上安村	22.32	上安橋	西巒
DF97001	台中市—北屯區民德里	15.58	大坑	慶福山
DF97002	台中縣—新社鄉協成村	17.44	新伯公	東勢
DF97003	南投縣—仁愛鄉法治村	33.09	武界	北坑
DF97004	南投縣—仁愛鄉南豐村	31.75	楓樹林	凌霄
DF97005	南投縣—仁愛鄉南豐村	31.75	仁愛	楓樹林
DF97006	南投縣—信義鄉潭南村	34.85	青雲	西巒
DF97007	南投縣—信義鄉豐丘村	25.71	信義	豐丘
DF97008	南投縣—埔里鎮麒麟里	26.75	北坑	魚池
DF97009	南投縣—埔里鎮麒麟里	33.29	北坑	武界
DF98001	南投縣—水里鄉玉峰村	20.12	水里	龍神橋
DF98002	南投縣—信義鄉同富村	30.00	水里	和社
DF98003	南投縣—信義鄉神木村	30.00	新興橋	和社
DF98004	南投縣—信義鄉神木村	34.57	神木村	新高口
DF98005	南投縣—信義鄉神木村	34.57	神木村	新高口
DF98006	南投縣—信義鄉望美村	25.18	望鄉	和社
DF98007	雲林縣—古坑鄉草嶺區	29.11	草嶺	豐山

(2) 案例分析成果

由中央氣象局雨量站之土石流災害發生時刻前7日致後3日之時雨量資料進行筒狀模式分析，成果如表3所示。

表3 案例分析結果

編號	發生日期	發生時間	時雨量 (mm)	土壤雨量指 數 SWI(mm)	第一筒深 度(mm)	第二筒深 度(mm)	第三筒深 度(mm)
----	------	------	-------------	--------------------	---------------	---------------	---------------

DF95001	95_06_10	12:00	4	196.5	51.1	70.7	74.6
DF97001	97_07_18	8:00	148	334.3	262.6	63.9	7.8
DF97002	97_07_18	6:00	77	187.7	151.3	29.6	6.8
DF97003	97_07_18	2:00	45	153.7	128.7	24.1	0.9
DF97004	97_09_15	8:00	58	402.2	174.2	126.5	101.4
DF97005	97_09_15	5:00	33	290.8	101.5	99.4	89.8
DF97006	97_07_18	2:00	106	208.2	184.4	22.9	0.9
DF97007	97_09_15	17:00	2	178.3	17.8	42.7	117.7
DF97008	97_07_18	4:00	90	247.2	176.3	58.9	11.9
DF97009	97_07_18	4:00	90	247.2	176.3	58.9	11.9
DF98001	98_08_08	17:00	13	125.0	45.6	37.4	42.1
DF98002	98_08_09	2:00	26	228.2	99.4	70.9	57.9
DF98003	98_08_08	18:00	41	281.3	117.2	93.4	70.8
DF98004	98_08_08	15:00	33	270.7	104.0	94.5	72.2
DF98005	98_08_08	21:00	38	354.2	135.8	123.3	95.0
DF98006	98_08_09	2:00	49	379.4	129.8	104.8	144.7
DF98007	98_08_08	22:00	35	397.2	129.1	125.4	142.6

(3) 涵蓋案例百分比

由(10)~(14)是計算各案例 RTI1~RTI2 之值，如表 4 所示，將各 RTI 值由小至大排序後，可得到案例涵蓋百分比之 RTI 值，如表 5 所示。

表 4 土石流案例 RTI 值列表

編號	RTI1	RTI2	RTI3	RTI4
DF95001	785.8	10,035.1	13,897.3	14,661.9
DF97001	49,483.4	87,813.6	21,381.3	2,593.4
DF97002	14,449.3	28,385.5	5,560.3	1,267.8
DF97003	6,917.5	19,788.7	3,710.3	131.6
DF97004	23,327.8	70,068.7	50,896.7	40,802.8
DF97005	9,597.5	29,533.1	28,922.9	26,128.9
DF97006	22,071.3	38,401.9	4,772.7	180.8
DF97007	356.6	3,182.0	7,611.5	20,991.2
DF97008	22,246.2	43,588.0	14,563.4	2,946.6
DF97009	22,246.2	43,588.0	14,563.4	2,946.6
DF98001	1,624.5	5,692.1	4,667.7	5,255.8
DF98002	5,933.6	22,677.2	16,187.3	13,217.4
DF98003	11,534.6	32,971.5	26,263.2	19,912.7
DF98004	8,934.2	28,156.6	25,584.4	19,555.8

DF98005	13,458.2	48,093.5	43,681.5	33,655.9
DF98006	18,588.2	49,231.4	39,765.2	54,911.0
DF98007	13,900.3	51,274.7	49,818.2	56,637.4

表 5 土石流案例百分比之 RTI 值列表

涵蓋案例百分比(%)	RTI1	RTI2	RTI3	RTI4
100	49,483	87,814	50,897	56,637
90	22,571	56,913	45,522	45,035
80	22,176	48,776	35,428	30,645
70	18,174	43,588	26,195	20,883
60	14,010	39,439	22,222	19,627
50	12,496	31,252	15,375	13,940
40	9,465	28,340	14,430	4,794
30	7,119	23,225	8,240	2,947
20	3,348	13,937	5,088	1,798
10	657	4,939	4,380	166

(4) 土砂災害警戒基準線

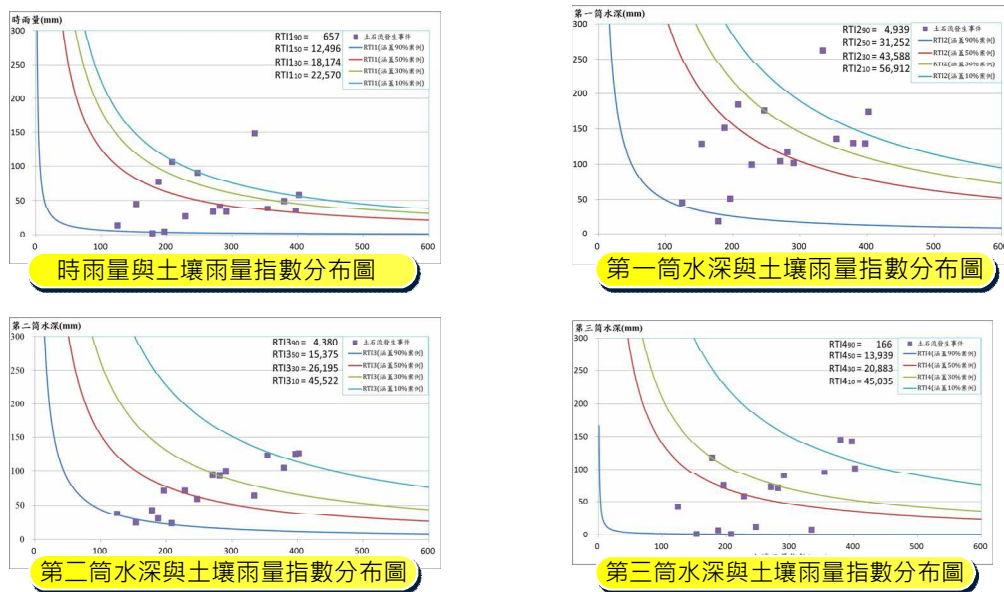


圖 17 土石流警戒基準線

2. 崩塌地

(1) 案例基本資料

本研究採用水土保持局土石流防災資訊網之 96 年至 99 年中部地區崩

塌地案例 29 場進行分析，各案例基本資料如表 6 所示。

表 6 崩塌地案例基本資料

編號	行政區域	平均坡度(%)	鄰近雨量站 1	鄰近雨量站 2
LS96001	台中縣—太平市頭汴里	21.27	中竹林	大坑
LS96002	南投縣—仁愛鄉大同村	30.96	仁愛	萬大
LS96003	南投縣—仁愛鄉互助村	23.57	清流	凌霄
LS96004	南投縣—仁愛鄉互助村	28.08	清流	阿眉
LS96005	南投縣—埔里鎮蜈蚣里	30.51	埔里	北坑
LS96006	南投縣—國姓鄉南港村	22.57	九份二山	北山
LS96007	南投縣—國姓鄉乾溝村	29.39	清水林	水長流
LS96008	南投縣—鹿谷鄉清水村	18.11	中寮	蘆竹南
LS97001	台中市—北屯區大坑里	15.58	大坑	新伯公
LS97003	台中縣—東勢鎮慶福里	17.44	慶福山	新伯公
LS97004	南投縣—中寮鄉福盛村	25.68	樟湖	蘆竹南
LS97005	南投縣—仁愛鄉精英村	34.19	廬山	仁愛
LS97006	南投縣—水里鄉郡坑村	22.32	上安橋	西巒
LS97007	南投縣—信義鄉豐丘村	25.71	信義	丘豐
LS98001	南投縣—水里鄉玉峰村	20.12	水里	龍神橋
LS98002	南投縣—信義鄉神木村	30.00	新興橋	和社
LS98003	南投縣—信義鄉神木村	34.57	神木村	新高口
LS98004	南投縣—國姓鄉南港村	22.57	九份二山	樟湖
LS98005	南投縣—鹿谷鄉和雅村	24.13	鳳凰	溪頭
LS98006	雲林縣—古坑鄉草嶺村	29.23	草嶺	豐山
LS98007	雲林縣—古坑鄉草嶺村	32.10	草嶺	豐山
LS98008	雲林縣—古坑鄉草嶺村	32.10	草嶺	豐山
LS98009	雲林縣—古坑鄉草嶺村	29.11	草嶺	豐山
LS98010	雲林縣—古坑鄉華山村	11.49	山豬湖	山豬湖
LS98011	雲林縣—古坑鄉樟湖村	25.92	桶頭	草嶺
LS98012	雲林縣—古坑鄉樟湖村	25.92	桶頭	草嶺
LS98013	雲林縣—古坑鄉樟湖村	30.04	瑞里	奮起湖
LS98014	雲林縣—古坑鄉樟湖村	25.92	桶頭	草嶺
LS98015	雲林縣—古坑鄉樟湖村	25.92	桶頭	草嶺

(2) 案例分析成果

由中央氣象局雨量站之崩塌地災害發生時刻前 7 日致後 3 日之時雨量資料進行筒狀模式分析，成果如表 7 所示。

表 7 案例分析結果

編號	發生日期	發生時間	時雨量 (mm)	土壤雨量指 數 SWI(mm)	第一筒深 度(mm)	第二筒深 度(mm)	第三筒深 度(mm)
LS96001	96_10_06	23:00	25	110.1	65.3	35.2	9.6
LS96002	96_06_09	4:00	10.5	142.4	34.7	48.3	59.5
LS96003	96_06_04	7:00	3.5	27.3	18.3	8.3	0.7
LS96004	96_06_04	20:00	0	56.8	16.9	25.5	14.4
LS96005	96_08_13	7:00	43.5	159.5	100.1	37.7	21.7
LS96006	96_06_07	16:00	22	82.1	54.6	23.7	3.7
LS96007	96_06_08	16:00	8	148.2	64.2	48.7	35.2
LS96008	96_08_10	16:00	6	12.0	8.6	2.9	0.5
LS97001	97_09_15	11:00	37	209.4	69.2	64.8	75.4
LS97003	97_07_18	11:00	12	196.5	95.8	85.6	15.0
LS97004	97_07_18	5:00	56	294.5	182.9	93.2	18.4
LS97005	97_09_15	11:00	51	379.0	124.0	123.9	131.1
LS97006	97_09_14	10:00	33	196.5	92.5	68.4	35.7
LS97007	97_09_15	17:00	2	181.1	17.8	42.7	120.6
LS98001	98_08_09	2:00	26	228.2	99.4	70.9	57.9
LS98002	98_08_08	20:00	36	301.2	119.8	103.7	77.8
LS98003	98_08_08	8:00	20	206.0	81.7	74.0	50.3
LS98004	98_08_09	5:00	21	329.5	83.3	99.6	146.7
LS98005	98_08_09	10:00	58	385.4	129.8	134.9	120.6
LS98006	98_08_09	3:00	64	535.8	210.0	163.4	162.4
LS98007	98_08_09	6:00	33	504.7	146.4	179.8	178.5
LS98008	98_08_08	22:00	35	397.2	129.1	125.4	142.6
LS98009	98_08_09	:00	68	450.2	166.6	133.8	149.9
LS98010	98_08_09	7:00	11	351.2	91.0	134.7	125.5
LS98011	98_08_09	6:00	32	384.2	129.5	142.2	112.5
LS98012	98_08_08	22:00	27	286.7	109.0	99.2	78.5
LS98013	98_08_09	6:00	25	488.9	141.8	185.1	162.0
LS98014	98_08_09	6:00	32	384.2	129.5	142.2	112.5
LS98015	98_08_09	5:00	43	384.4	138.0	138.8	107.6

(3)涵蓋案例百分比

由(10)~(14)是計算各案例 RTI1~RTI2 之值，如表 8 所示，將各 RTI

值由小至大排序後，可得到案例涵蓋百分比之 RTI 值，如表 8 所示。

表 8 崩塌地案例 RTI 值列表

編號	RTI1	RTI2	RTI3	RTI4
LS96001	2,752.7	7,194.3	3,871.5	1,057.8
LS96002	1,495.7	4,938.2	6,879.8	8,473.9
LS96003	95.5	499.3	226.0	19.3
LS96004	0.0	961.3	1,445.7	817.6
LS96005	6,939.1	15,972.5	6,016.0	3,457.9
LS96006	1,805.9	4,485.7	1,945.0	307.2
LS96007	1,185.3	9,514.1	7,217.8	5,220.4
LS96008	71.9	103.1	34.7	6.0
LS97001	7,748.3	14,497.8	13,571.8	15,784.1
LS97003	2,357.5	18,830.5	16,812.8	2,953.0
LS97004	16,494.0	53,877.5	27,446.2	5,427.5
LS97005	19,327.9	46,979.5	46,968.5	49,676.6
LS97006	6,485.2	18,170.1	13,441.5	7,009.6
LS97007	362.3	3,232.9	7,737.8	21,838.2
LS98001	5,933.6	22,677.2	16,187.3	13,217.4
LS98002	10,844.6	36,085.8	31,226.1	23,433.6
LS98003	4,119.8	16,833.2	15,245.2	10,354.0
LS98004	6,919.9	27,446.3	32,810.1	48,326.3
LS98005	22,350.3	50,034.6	51,979.5	46,481.0
LS98006	34,292.0	112,510.0	87,553.6	87,032.1
LS98007	16,656.6	73,901.8	90,766.8	90,098.2
LS98008	13,900.3	51,274.7	49,818.2	56,637.4
LS98009	30,614.5	75,004.1	60,217.7	67,469.6
LS98010	3,863.3	31,968.7	47,290.8	44,087.8
LS98011	12,295.5	49,744.6	54,653.6	43,237.4
LS98012	7,742.1	31,264.5	28,443.4	22,514.3
LS98013	12,222.0	69,299.1	90,512.7	79,192.1
LS98014	12,295.5	49,744.6	54,653.6	43,237.4
LS98015	16,530.7	53,067.0	53,362.1	41,361.5

表 9 崩塌地案例百分比之 RTI 值列表

涵蓋案例百分比(%)	RTI1	RTI2	RTI3	RTI4
100	34,292	112,510	90,767	90,098
90	19,630	69,759	62,951	68,642
80	16,501	51,633	53,620	48,596

70	12,295	49,745	48,049	43,493
60	8,987	33,616	31,860	30,605
50	6,929	25,062	22,129	18,811
40	5,208	17,635	14,576	9,602
30	2,634	13,003	7,582	5,365
20	1,434	4,848	5,587	2,574
10	93	915	1,324	278

(4) 土砂災害警戒基準線

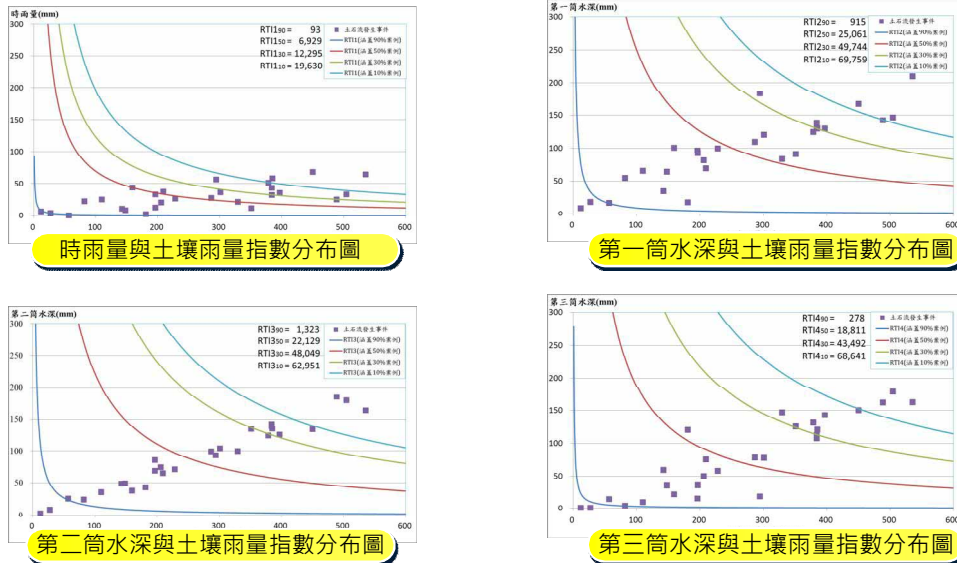


圖 18 崩塌警戒基準線

(二) 理論流出孔徑推導成果

$$QF1 = \sqrt{gH} \times A1 = \sqrt{gH} \times \pi r1^2 \quad (15)$$

單位 m $\frac{QF1}{A*} \times 3600 = 0.1 \times H$

$$\frac{\sqrt{gH} \times \pi r1^2}{A*} \times 3600 = 0.1 \times H / 1000$$

$$r1 = \frac{\sqrt{0.12} \times \sqrt{A*} \times \sqrt[4]{H}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

$$QR1 = \sqrt{g(H-15)} \times A2 = \sqrt{g(H-15)} \times \pi r2^2$$

單位 m $\frac{QR1}{A*} \times 3600 = 0.1 \times (H-15)$

$$\frac{\sqrt{g(H-15)} \times \pi r2^2}{A*} \times 3600 = 0.1 \times (H-15) / 1000$$

$$r2 = \frac{\sqrt{0.1} \times \sqrt{A*} \times \sqrt[4]{(H-15)}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

$$QR2 = \sqrt{g(H-60)} \times A3 = \sqrt{g(H-60)} \times \pi r3^2$$

$$\text{單位 m} \quad QR2/A_* \times 3600 = 0.15 \times (H-60)$$

$$\frac{\sqrt{g(H-60)} \times \pi r3^2}{A_*} \times 3600 = 0.15 \times (H-60) / 1000$$

$$r3 = \frac{\sqrt{0.15} \times \sqrt{A_*} \times \sqrt[4]{(H-60)}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

$$QF2 = \sqrt{gH} \times A4 = \sqrt{gH} \times \pi r4^2$$

$$\text{單位 m} \quad QF2/A_* \times 3600 = 0.05 \times H$$

$$\frac{\sqrt{gH} \times \pi r4^2}{A_*} \times 3600 = 0.05 \times H / 1000$$

$$r4 = \frac{\sqrt{0.05} \times \sqrt{A_*} \times \sqrt[4]{H}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

$$QR3 = \sqrt{g(H-15)} \times A5 = \sqrt{g(H-15)} \times \pi r5^2$$

$$\text{單位 m} \quad QR3/A_* \times 3600 = 0.05 \times (H-15)$$

$$\frac{\sqrt{g(H-15)} \times \pi r5^2}{A_*} \times 3600 = 0.05 \times (H-15) / 1000$$

$$r5 = \frac{\sqrt{0.05} \times \sqrt{A_*} \times \sqrt[4]{(H-15)}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

$$QF3 = \sqrt{gH} \times A6 = \sqrt{gH} \times \pi r6^2$$

$$\text{單位 m} \quad QF3/A_* \times 3600 = 0.01 \times H$$

$$\frac{\sqrt{gH} \times \pi r6^2}{A_*} \times 3600 = 0.01 \times H / 1000$$

$$r6 = \frac{\sqrt{0.01} \times \sqrt{A_*} \times \sqrt[4]{H}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

$$QR4 = \sqrt{g(H-15)} \times A7 = \sqrt{g(H-15)} \times \pi r7^2$$

$$\text{單位 m} \quad QR4/A_* \times 3600 = 0.01 \times (H-15)$$

$$\frac{\sqrt{g(H-15)} \times \pi r7^2}{A_*} \times 3600 = 0.01 \times (H-15) / 1000$$

$$r7 = \frac{\sqrt{0.01} \times \sqrt{A_*} \times \sqrt[4]{(H-15)}}{\sqrt{\pi} \times \sqrt[4]{g \times 60 \times \sqrt{1000}}}$$

(三) 家用筒狀模式雨量筒

由寶特瓶實驗結果顯示一小時水為降低 9.3mm，平均流速為 0.155mm/min，流出比為每小時 0.093 接近於筒狀模式中第一筒流出比 0.1，顯示採用縫針可製作第一筒模型

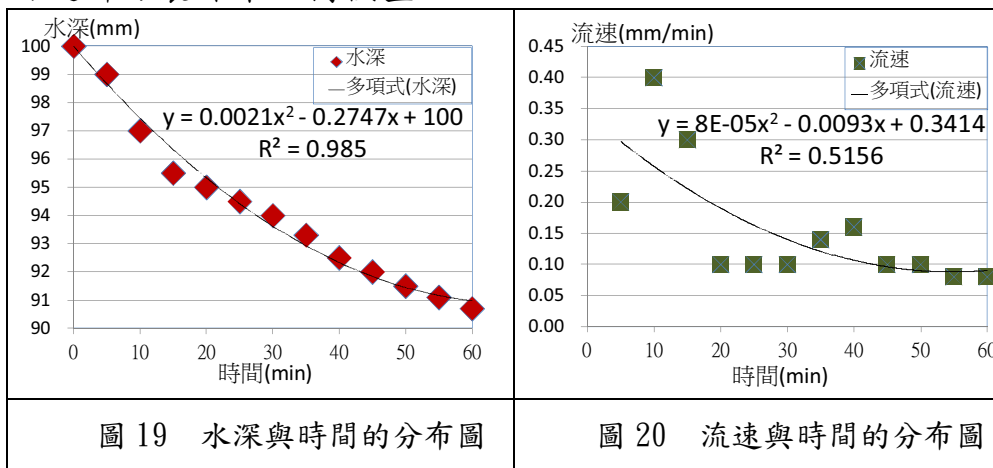


圖 19 水深與時間的分布圖

圖 20 流速與時間的分布圖

五、結論(Results and Suggestions)

依分析結果顯示：

(一)

由土石流及崩塌地 RTI 值結果顯示，土石流案例中 RTI1 及 RTI2 值較崩塌地高 80%及 25%，崩塌地案例中 RTI1 值偏低，RTI2、RTI3 及 RTI4 值則極接近，此與相關研究所得知，土石流發生需有大量降雨有關，而崩塌地發生於各層土層含水量達一定程度時即發生崩塌有關。

(二)

由土石流及崩塌地四種涵蓋 90%案例 RTI 值結果顯示，RTI2 及 RTI3 兩種仍較合理，RTI1 及 RTI4 低於 200，顯示災害發生時刻之時雨量(I)與第三筒水深(H₃)處於偏低情形，因此 RTI1 及 RTI4 對於災害警戒應用性較低。

(三)

依水土保持局現行 2010 年土石流警戒基準值研究為基礎，繪製涵蓋百分比 90%、50%、30%、10%。

六、展望與建議(Suggestions)

透過本實驗雨量筒裝置，設於每一個家庭中，實際自行觀測的第一手資料，達預警之效果，使居家能感到安全，且本次實驗之材料皆是一些可由周遭生活中所取得之物，如本次實驗器材為廢棄的汽水寶特瓶，不僅可做為預警裝置，還能達到廢棄物重新利用，做到維護環境的效果，期望未來此居家之雨量筒能廣為人所知，並推廣而大量使用。

七、參考文獻 (References)

1. 水土保持局，2010，99 年土石流警戒基準值檢討與更新。
2. 水土保持局，2010，筒狀模式結合土壤水份指數建構坡地土砂災害警戒機制。
3. 林美聆、陳天健、林鴻州、游文輝，2003，台北市崩塌警戒模式訂定方法之研究，中華水土保持學報，34D.:389-399。
4. 詹錢登，2002，坡地災害警戒值訂定與土石流觀測示範站之研究，行政院農委會水土保持局 91 年科技計畫報告。
5. 謝正倫，1995，土石流預警系統之研究（第五年），行政院農業委員會委託計畫。
6. 岡田憲治，2002，土壤雨量指數，測候時報，69.5。
7. Caine, N., 1980, "The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flow," *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.
8. Cannon, S. H. and Ellen, S. D., 1985, "Rainfall Conditions for Abundant Debris Avalanches in San Francisco Bay California," *California Geology*, 38(12), 267-272.
9. Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brab, E. E., Brown, W. M., Ellen, S. D., Harp, E. L., Wieczorek, G. F., Alger, (C) S., and Zatkin, R. S., 1987, "Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall," *Science*, 238, 921-925.
10. Nobutomo OSANAI, Takeshi SHIMIZU, Kazumasa KURAMOTO, Shinichi KOJIMA and Tomoyuki NORO (2010), "Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network," *Landslide* (accepted).
11. Yasuo ISHIHARA and Shigeki KOBATAKE, 1979, "Runoff Model for Flood Forecasting," *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 29, Part 1. NO. 260.

【評語】 040805

本作品運用日本筒狀模式，概算各層筒孔徑水流速率及水深關係，並藉以製作家用雨量筒，並用於土石流及崩塌地的預測；經由實驗的結果及分析，已提出筒狀分析模式解析台灣中部 2006 至 2009 年間的土石流及崩塌地 RTI 量測值範圍。本作品以科學方法探討自然環境變化，歸納出有用的觀察及法則，有不錯的應用價值。