

筒狀模式之土壤雨量指數應用於土石流防災警戒

陳樹群^[1] 蔡喬文^{[1]*} 陳振宇^[2] 陳美珍^[2]

摘 要 筒狀模式為模擬雨量在地表逕流及土層入滲及滲流等移動行為之概念模式。日本將模式分為三層筒，可視為表層、中層與深層等土壤層，三筒水深總和稱為土壤雨量指數 (SWI)，可應用於坡地防災。本研究以日本研究為基礎，結合現行警戒基準值概念，並分析東部土石流觀測站案例。結果顯示 SWI 與第二筒水深 H_2 為線性關係，代表中層土壤水分與土石流案例相關性最高，可應用於土石流預警。且 $SWI > 107\text{mm}$ 方有土石流發生，可作為東部地區防災警戒參考。

關鍵詞：筒狀模式、土壤雨量指數、土石流災害、警戒基準值。

Soil Water Index Applied as a Debris Flow Warning-Reference Based on a Tank Model

Su-Chin Chen^[1] Chiao-Wen Tsai^{[1]*} Chen-Yu Chen^[2] Mei-Chen Chen^[2]

ABSTRACT A tank model is a conceptual model which simulates the moving behavior of water in the soil layers, including runoff, infiltration and percolation. The water depths of three tanks, representing surface, middle and deeper soil layers, respectively, were summed up as a soil water index (SWI). This study analyzes the debris flow cases in Eastern Taiwan based on the tank model and the current warning threshold value for debris flow. Results showed SWI has a linear relationship with the depth in the second tank, i.e. the soil moisture in the middle soil layer is closely related to the occurrence of debris flow cases. In addition, debris flow occurred when $SWI > 107\text{mm}$. This finding can be used as a warning for debris flow in Eastern Taiwan.

Key Words : Tank model, soil water index, debris flow disaster, warning threshold value.

一、前 言

由降雨發展到河川流量，中間需歷經地表逕流、入滲、滲透、地下水及出滲等過程，每一過程都具有極其複雜之地形、地質及土壤等條件。為忽略其中複雜的過程因子，直接估算降雨（輸入）與流量（輸出）之關係，一般稱為黑盒模式，本文所使用之筒狀模式便是其中一種。

菅原正巳 (1972) 在日本提出以筒狀模式分析地表水文歷線，以模擬地表逕流及地下滲流水等方式，可由雨量資料快速預測河川流量。岡田憲治 (2002) 亦認為筒狀模式應用於河川水位推估具有良好效果，且可適用於面積 $10^2 \sim 10^2 \text{ km}^2$ 集水區，因此在日本受到廣泛採用。Ishihara and Kobatake (1979) 則針對日本地質種類，給定 4 種筒狀模式參數建議值。岡田憲治 (2002) 提到日本氣象廳 1990 年針對 Ishihara and Kobatake

[1] 國立中興大學水土保持學系

Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

[2] 行政院農委會水土保持局土石流防災中心

Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : d099042001@mail.nchu.edu.tw

(1979) 所發展出筒狀模式參數進行驗證，研究發現 4 類不同地質之參數值之計算結果，僅差距幾個百分點，代表各地質條件的參數敏感度不高，因此日本氣象廳建議全日本筒狀模式都採用花岡岩參數。

筒狀模式在台灣也受到廣泛使用，陳樹群 (1994)、畢嵐杰 (2004) 及李光敦等人 (2007) 等學者，都曾以筒狀模式推估台灣集水區之降雨逕流或污染物經地下水在地表土層之傳輸過程，均得到良好結果。中國大陸的王光謙和劉家宏 (2005) 也以筒狀模式概念模擬黃河流域河川流量及輸砂量等，進而提供黃河流域管理參考。

台灣現行的土石流警戒模式是以土石流案例中 60 分鐘降雨強度與有效累積雨量值，利用詹錢登等人 (2002) 之機率法劃定土石流警戒基準值，再者由氣象局預測累積雨量與實測有效累積雨量等兩值是否超越土石流警戒基準值，判定黃色警戒與紅色警戒之發布。此種以有效累積雨量作為警戒指標之方法，為本類型研究之重點。

雖然土石流的發生主要由颱風與豪雨期間降雨所誘發，但是現場地文狀況和土石流發生亦有相當程度的相關性。惟山區地貌、地質及土壤等特性難以取得。且氣象局自記式雨量站可即時提供雨量資料，因此僅以即時雨量或累積雨量作為判定因子，而忽略地文因子之影響性，如此作為判定土石流潛勢溪流或其他坡地災害之發生機制及疏散避難時機略顯不足，且筒狀模式之架構在於模擬雨量在地表逕流及土層入滲及滲流等移動行為之概念模式，除可模擬降雨後之地表逕流外，亦可藉由土壤雨量指數(*SWI*)模擬雨量入滲後之地下水於土層流動之情形，因此較現行單純採用雨量分析更能貼近實際狀況。

另由相關研究可知，*SWI* 在日本地區行之有年，且已發展成熟。但台灣地區尚未進行 *SWI* 相關研究，且藉由 *SWI* 之土層含降雨深度特性，可將地文因子納入坡地災害發生機制中，故本研究嘗試以 Osanai et al. (2010) 研究為基準，以 60 分鐘降雨量及 *SWI* 作為主要因子，結合水土保持局現行降雨驅動指標(*RTI*)計算公式，以有效累積雨量 (R_t) 改為 *SWI*，除考慮原有降雨強度 I 外，再以第一、二、三筒水深 (H_1 、 H_2 、 H_3) 代入，得到 4 種土石流警戒基準值，最後依機率法建立土砂災害發生危險基準線，探討 4 種土石流警戒基準值特性，用以判定土石流潛勢溪流發生時間及最佳疏散時機，並提出應用方法，作為台灣東部地區防災警戒參考。

二、研究方法

本研究方法是以前述筒狀模式計算土壤雨量指數 (三層筒水深之合)，由土石流發生時刻之時雨量、第一、二、三筒水深與土壤雨量指數，推求警戒基準值，各項研究方法分述如下：

1. 筒狀模式 (Tank Model)

筒狀模式為一種將坡面土層區分為數層筒後 (圖 1)，以時間序列方式計算降雨量於各層筒流動行為，各層筒流出量總和視為坡面逕流量之概念模式。

日本現行筒狀模式乃以三層筒進行計算，其中，第一筒可視為地表及表層土壤，第二筒可視為中層土層，第三筒可視為深層土層，如圖 1 所示。在單場降雨時，各層水筒內的流動行為如下列 4 點假設情形：

- (1) 降雨後，雨水從第一筒、第二筒至第三筒依序移動，移動時間以 1 小時為計算單元。
- (2) 各筒儲留量與各筒內儲留高度 (= 儲留量÷底面積) 呈比例關係。因此只要考量各筒儲留高度即可，而不需考量集水區面積的大小。
- (3) 當各筒的儲留高度超過一定高度後，即從側向橫孔流出，形成地表逕流。
- (4) 雨水除了地表逕流外，最後由第三筒的底孔移動至深層地下水水層。

本研究採用日本筒狀模式架構，並先以表 1 之花岡岩參數，進行台灣地區之後續分析。

2. 土壤雨量指數 (soil water index, *SWI*)

日本定義「土壤雨量指數」(*SWI*, soil water index) 為「土壤中所儲留之雨量深度」，即為筒狀模式中，三層筒水深值總和。日本於 1979 年開始將土壤雨量指數應用邊坡破壞之研究，鈴木雅一等人 (1979) 根據日本六甲山邊坡破壞進行模擬，結果認為第一筒與第二筒的峰值區間，最接近邊坡土體破壞時間。柴田徹等人 (1984) 則利用筒狀模式重新模擬 1983 年 7 月山陰及濱田市因豪雨誘發的土砂災害，模擬結果顯示 97% 土體破壞案例大都發生在土壤雨量指數 125mm 以上。由上述研究成果，岡田憲治 (2002) 歸納下列結論：因降雨而誘發的邊坡破壞情形，其發生時間並非為最大降雨強度發生時刻，通常是「土壤雨量指數超過土砂災害發生之臨界值至第二筒達峰值之間」，尤其是出現歷史最大降雨量後至第二筒的峰值間，為最危險的時間區段。

日本現行以土壤雨量指數作為土砂災害應變階段時機之準則,在 Osanai et al. (2010) 研究以 Kuramoto et al. (2001) 提出類神經網路 (RBFN 法, radial basis function network) 建構非線性土砂災害發生臨界線 (CL, critical line) 之方法為架構,並由 Kuramoto et al. (2005) 研究分析中由短期降雨指數 (包含 10 分鐘降雨量、30 分鐘降雨量、60 分鐘降雨量、120 分鐘降雨量、180 分鐘降雨量) 及長期降雨指數 (包含 24 小時累積雨量、72 小時累積雨量及土壤雨量指數) 組成 7 組資料,分析各組正確預測災害率對應平均超越警戒值時間及錯誤預報率成果,Osanai et al. (2010) 研究中以短期降雨指數採用 60 分鐘降雨量及長期降雨指數採用土壤雨量指數,並於 2008 年時建立全日本土砂災害發生臨界線 (CL),作為判定土砂災害應變階段之準則。

3. 降雨驅動指標 (rainfall triggering index, RTI)

首先根據林李耀等 (2004) 提到國內外利用降雨參數來預警土砂災害,作為警戒與避難基準的研究包含下列三種型式,各學者所發展土石流發生降雨驅動指標模式如表 2 所示。

- (1) 利用土石流案例之有效降雨量與有效降雨強度資料迴歸建立經驗公式,如瀨尾克美與船崎昌繼 (1973)、謝正倫 (1991)。
- (2) 以土石流案例之降雨延時和降雨強度作為降雨驅動指標參數,以迴歸方式求出土石流發生臨界線,如 Caine (1980)、Cannon and Ellen (1985)、

Wieczorek (1987) 與 Keefer et al. (1987)、范正成等人 (2001)。

- (3) 採前期雨量、單場累積雨量、當日累積雨量、降雨延時、平均降雨強度及降雨強度等水文參數作為座標軸,由土石流發生案例作為劃定土石流發生臨界線基礎,如謝正倫 (1995) 採用有效累積降雨量為橫軸並以降雨強度為縱軸,所發展的模式如圖 2 所示。詹錢登等人 (2002) 採用降雨強度與有效累積降雨量兩項指數,並以機率概念提出土石流降雨驅動指標模式,如圖 3 所示。水土保持局於 2005 年即採用詹錢登等人 (2002) 之方法訂定各鄉鎮區之土石流警戒基準值,並每年度檢討更新土石流警戒基準值至今 (詹錢登, 2010)。

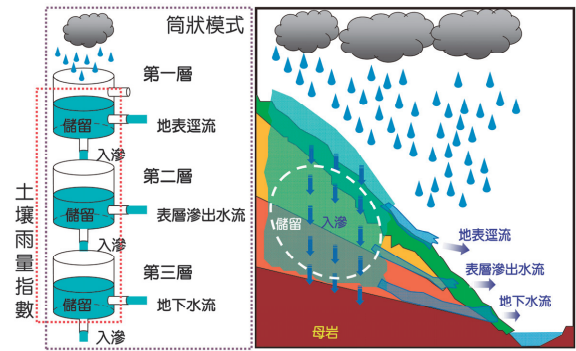


圖 1 筒狀模式示意圖 (Okada, 2002)

Fig.1 Conceptual diagram of tank model

表 1 日本筒狀模式參數列表 (Ishihara and Kobatake, 1979)

Table 1 Parameters of Japanese tank model

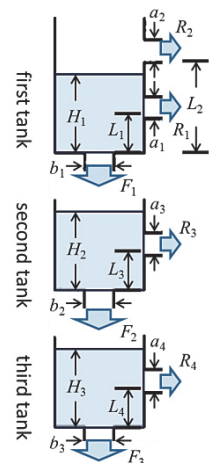
地質	L_1	L_2	L_3	L_4	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3
花崗岩	15	60	15	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.05	0.01
火山岩	30-40	60-75	15	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.08	0.01
古生代地層	30	75	5	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01
第三紀、第四紀地層	15	40	5	15	0.10	0.15	0.05	0.01	0.12	0.04	0.01

方程式:

符號說明:

$R_1 = (H - L_1) \times a_1$ L_1 : 第一筒第一層出流水深 (mm)
 $R_2 = (H - L_2) \times a_2$ L_2 : 第一筒第二層出流水深 (mm)
 $R_3 = (H - L_3) \times a_3$ L_3 : 第二筒出流水深 (mm)
 $R_4 = (H - L_4) \times a_4$ L_4 : 第三筒出流水深 (mm)
 $F_1 = H \times b_1$ a_1 : 第一筒第一層出流比
 $F_2 = H \times b_2$ a_2 : 第一筒第二層出流比
 $F_3 = H \times b_3$ a_3 : 第二筒出流比
 a_4 : 第三筒出流比
 b_1 : 第一筒入滲比
 b_2 : 第二筒入滲比
 b_3 : 第三筒入滲比

R_1 : 第一筒第一層出流量 (mm)
 R_2 : 第一筒第二層出流量 (mm)
 R_3 : 第二筒出流量 (mm)
 R_4 : 第三筒出流量 (mm)
 H_1 : 第一筒水深 (mm)
 H_2 : 第二筒水深 (mm)
 H_3 : 第三筒水深 (mm)
 F_1 : 第一筒入滲量 (mm)
 F_2 : 第二筒入滲量 (mm)
 F_3 : 第三筒入滲量 (mm)



Osanai et al. (2010) 提到土砂災害發生臨界線 (CL) 的劃定標準如圖 4 所示，其中縱軸為短期降雨指數，可為 10 分鐘降雨量、30 分鐘降雨量、60 分鐘降雨量、120 分鐘降雨量、180 分鐘降雨量等，橫軸為長期降雨指數，可為 24 小時累積雨量、72 小時累積雨量

及土壤雨量指數，依案例分布繪製出土砂災害發生臨界線 (CL)，臨界線 (CL) 以上代表災害發生機率高的區域，而臨界線 (CL) 由於選定的方法而可能是直線，彎曲或任意形狀。

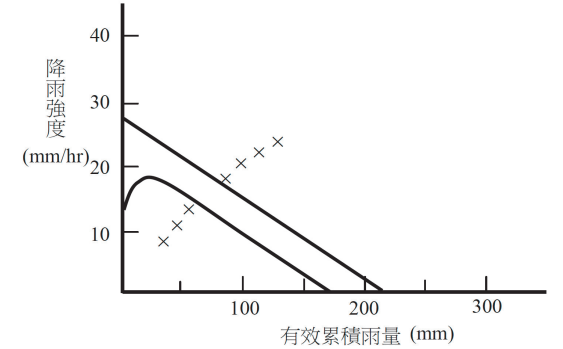


圖 2 謝正倫劃定土石流發生臨界線示意圖 (Shieh, 1995)

Fig.2 Schematic diagram of Shieh delimited the Criterion of disaster occurrence for debris flow warning

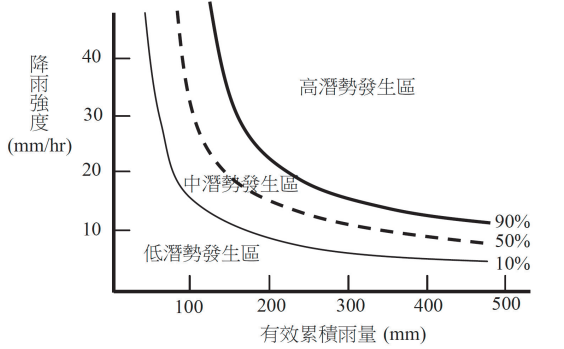


圖 3 利用機率法劃定土石流發生臨界線示意圖 (Jan et al., 2002)

Fig.3 Probability model delimited the Criterion of disaster occurrence for debris flow warning

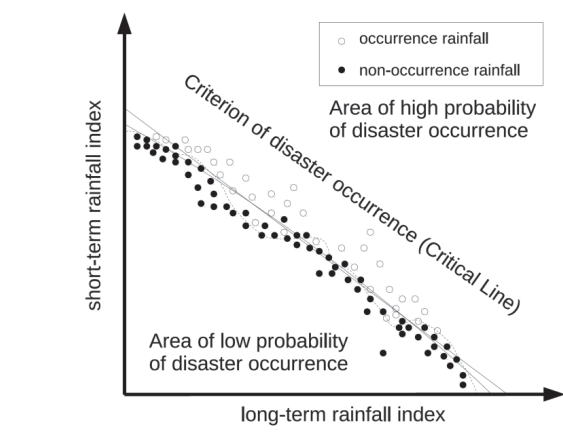


圖 4 土砂災害發生臨界線之示意圖 (Osanai et al., 2010)

Fig.4 Schematic diagram of warning critical-line for debris flow

中英對照表：
short-term rainfall index
短期降雨指數(如：5分、10分、60分雨量)
long-term rainfall index
長期降雨指數(如：1hr、3hr、12hr累積雨量)
criterion of disaster occurrence
災害發生規則
critical line (CL)
土砂災害發生臨界線
occurrence rainfall
發生土砂災害之降雨
non-occurrence rainfall
非發生土砂災害之降雨
area of high probability of disaster occurrence
土砂災害發生機率高之區域
area of low probability of disaster occurrence
土砂災害發生機率低之區域

表 2 相關學者所採用土石流降雨驅動指標 (adapted form Lin et al., 2003)

Table 2 Rainfall threshold value for debris flow warning in previous studies

學 者	降雨警戒關係式	參數說明
瀨尾克美與船崎昌繼 (1973)	$R_e = a / (I_e + b)$	R_e =有效累積雨量 I_e =有效降雨強度
Caine (1980)	$I = 14.82 T^{0.39}$	I =降雨強度 T =降雨延時
Cannon and Ellen (1985)	$T = a / (I - b)$	I =降雨強度 T =降雨延時
Wieczorek (1987)	$T = 0.9 / (I - 0.17)$	I =降雨強度 T =降雨延時
Keefer et al. (1987)	$(I - I_0) T = Q_c$	I =降雨強度 I_0 =流失降雨強度 T =降雨延時 Q_c =臨界滲透量
謝正倫 (1991)	$I_e = a R_e + b$	I_e =降雨強度 R_e =總有效累積雨量
范正成等人 (2001)	$R_e = -11.42 T_e - 55.97 L_e + 3652$	R_e =累積雨量 T_e =降雨延時 L_e =常數
詹錢登等人 (2002)	$R_t + aI = C$	R_t =總有效累積雨量 I =降雨強度

水土保持局現行土石流警戒基準值即是採用詹錢登等人 (2002) 研究所得 (1) 式及 (2) 式進行, 首先由往年土石流案例推求 (1) 式中 RTI 值, 並以 $I=10\text{mm}$ 代入 (1) 式推求 R_t 值以作為土石流警戒基準值:

$$RTI = I \times R_t \quad (1)$$

$$R_t = R_0 + P = \sum_{i=0}^7 \alpha^i R_i \quad (2)$$

式中, RTI 為土石流警戒基準值、 I 為土石流發生時刻之時雨量 (mm/hr)、 R_t 為累積雨量 (mm)、 R_0 為本次降雨開始後至土石流發生之累計雨量 (mm)、 R_i 為本次降雨開始前 i 天降雨量 (mm)、 α 為雨量影響權重, 水土保持局以 $\alpha=0.8$ 代入計算。

4. 土砂災害發生臨界線 (CL)

本研究嘗試採用 Ishihara and Kobatake (1979) 所推導花崗岩參數進行筒狀模式分析, 如表 1 所示, 並選用台灣東部地區鳳義坑及大興土石流潛勢溪流觀測站, 計算 7 場颱風事件中 12 次土石流事件之土壤雨量指數, 再將水土保持局現行 RTI 計算公式中 R_t 有效累積雨量改為土壤雨量指數 (SWI), 除考慮原有降雨強度 I 外, 再以第一、二、三筒水深 (H_1 、 H_2 、 H_3) 代入, 最後依機率法建立四種土砂災害發生臨界線 (CL), 如下列四項公式:

$$CL_0 = I \times SWI \quad (3)$$

$$CL_1 = H_1 \times SWI \quad (4)$$

$$CL_2 = H_2 \times SWI \quad (5)$$

$$CL_3 = H_3 \times SWI \quad (6)$$

式中, 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), SWI 為土壤雨量指數 (mm) 係指三筒水深之總和。

三、研究試區

本研究考量水土保持局土石流觀測站之地質條件後, 採用地質條件相似之花蓮縣光復鄉大興村之大興 (花縣 DF118, 如圖 5) 及花蓮縣鳳林鎮鳳義里之鳳義坑 (花縣 DF125, 如圖 6) 等 2 處土石流潛勢溪流觀測站作為研究試區:

1. 基本資料

大興土石流潛勢溪流 (花縣 DF118) 位於南清水溪子集水區內, 總面積 1,149.7 公頃; 高程分布由 192 公尺至 1,924 公尺, 平均高程 881.5 公尺, 高程分布以 800 公尺至 1,000 公尺佔 20.3% 為最多 (每 200 公尺為區間); 坡度以六級坡 (55%~100%) 佔 57.4% 為最多, 其次為五級坡 (40%~55%) 佔 21.2%, 平均坡度為 67.8%; 坡向以東北向佔 20.8% 為最高, 東向佔 19.6% 次之。區內地質皆為大南澳片岩 (黑色片岩為主), 最鄰近本區的斷層為玉里斷層, 距離約 6km。土壤以崩積土及石質土為主。本研究套疊台灣 20mDEM (數值高程模型, digital elevation model) 資料, 求得各地形特性詳列於圖 5。

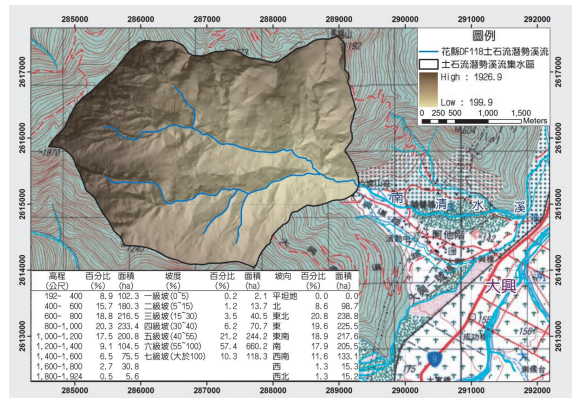


圖 5 大興 (花縣 DF118) 上游集水區地理位置圖

Fig.5 Location of Daxing sub-basin (Hualien DF118)

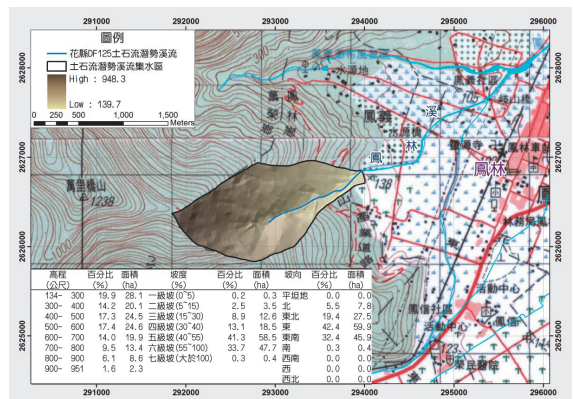


圖 6 鳳義坑 (花縣 DF125) 上游集水區地理位置圖

Fig.6 Location of Fengyikeng creek sub-basin (Hualien DF125)

鳳義坑土石流潛勢溪流（花縣 DF125）位於鳳林溪子集水區內，總面積 141.5 公頃；高程分布由 134 公尺至 951 公尺，平均高程 496.0 公尺，高程分布以 500 公尺至 600 公尺佔 17.4% 為最多（每 100 公尺為區間）；坡度以五級坡（40%~55%）佔 41.3% 為最多，其次為六級坡（55%~100%）佔 33.7%，平均坡度為 49.4%；坡向以東向佔 42.4% 為最高，東南向佔 32.4% 次之。區內地質以大南澳片岩（黑色片岩）為主，鄰近 5km 範圍內並無斷層經過。土壤以崩積土及石質土為

主。本研究套疊台灣 20mDEM 資料，求得各地形特性詳列於圖 6。

2. 土石流事件

本研究採用水土保持局大興及鳳義坑兩處土石流觀測站記錄土石流發生資料進行分析，如表 3，本研究配合時雨量資料及筒狀模式資料格式，採用每小時 01 分至 60 分之間內發生撞斷鋼索紀錄，皆視為下一時刻發生土石流案例，表 3 中 2 處觀測站中共計 12 場土石流案例。

表 3 東部土石流發生事件列表

Table 3 The cases of debris flow in Eastern Taiwan

颱風事件	土石流發生時間		案例No.	案例發生時刻	備註
	日期	時間			
大興土石流潛勢溪流 (花縣DF118) 觀測站					
聖帕	2007/08/18	04:18 (無線鋼索1)	1	2007_0818_05	第一場
		06:09 (無線鋼索2)	2	2007_0818_07	第二場
鳳凰	2008/07/28	05:08 (右支流下游)	3	2008_0728_06	第一場
		06:37 (左支流鋼索1)	4	2008_0728_07	第二場
		07:45 (右支流上游)	5	2008_0728_08	第三場
		08:00 (左支流鋼索2)			第四場
薈蜜	2008/09/28	06:45 (上游鋼索1)	6	2008_0928_07	第一場
芭瑪	2009/10/06	02:54 (未註明編號)	7	2009_1006_03	第一場
鳳義坑 (花縣DF125) 土石流潛勢溪流觀測站					
聖帕	2007/08/18	03:56 (下游鋼索2)	8	2007_0818_04	第一場
		04:03 (上游鋼索1)	9	2007_0818_05	第二場
		04:54 (上游鋼索2)			第三場
鳳凰	2008/07/28	04:29 (鋼索2)	10	2008_0728_05	第一場
		05:54 (下游鋼索1)	11	2008_0728_06	第二場
芭瑪	2009/10/06	02:44 (未註明編號)	12	2009_1006_03	第一場

備註：1. 土石流發生時間為土石流觀測站中記錄鋼索沖斷時間，數字代表為“西元年_月份日期_小時”。

2. 備註欄位代表該場颱風中所記錄第幾場土石流事件。

表 4 土石流發生事件之筒狀模式計算成果表

Table 4 Results of the debris flow cases calculated by tank model

土石流觀測站	NO.	土石流發生時刻	時雨量 (mm/hr)	累積雨量 (mm)	洪峰流量 (cms)	土壤雨量指數 (mm)	第一筒水深 (mm)	第二筒水深 (mm)	第三筒水深 (mm)	警戒基準值			
										CL ₀	CL ₁	CL ₂	CL ₃
大興 (花縣 DF118)	1	2007_0818_05	17.9	175.5	22.0	157.8	62.1	45.4	50.3	2,821	9,792	7,162	7,935
	2	2007_0818_07	41.0	250.6	57.3	212.5	104.2	55.0	53.3	8,700	22,146	11,676	11,320
	3	2008_0728_06	20.1	148.1	25.4	118.7	69.0	39.5	10.2	2,390	8,181	4,686	1,212
	4	2008_0728_07	26.5	174.6	35.4	137.2	80.5	44.6	12.1	3,638	11,034	6,112	1,658
	5	2008_0728_08	32.5	207.1	46.9	158.4	93.7	50.5	14.2	5,143	14,835	8,001	2,248
	6	2008_0928_07	14.4	96.8	15.3	107.3	57.9	22.6	26.8	1,543	6,217	2,426	2,875
	7	2009_1006_03	25.3	489.9	43.6	253.3	80.4	80.5	92.4	6,398	20,350	20,380	23,405
鳳義坑 (花縣 DF125)	8	2007_0818_04	17.2	156.1	2.3	141.0	56.8	43.2	41.0	2,416	7,998	6,086	5,776
	9	2007_0818_05	14.5	170.6	2.5	149.1	60.2	46.4	42.5	2,157	8,983	6,924	6,334
	10	2008_0728_05	33.3	182.6	5.2	144.0	88.4	45.0	10.6	4,796	12,720	6,475	1,522
	11	2008_0728_06	38.5	221.2	6.9	169.2	104.7	51.8	12.7	6,521	17,722	8,775	2,153
	12	2009_1006_03	35.5	360.0	5.0	210.6	82.2	55.8	72.6	7,476	17,301	11,754	15,286

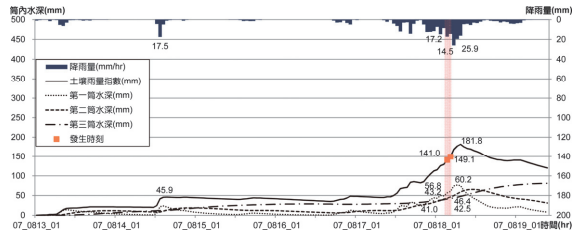
圖 7 大興 (花縣 DF118) 颱風期間土壤雨量指數圖
Fig.7 SWI of Daxing sub-basin (Hualien DF118) during typhoon

區域代表高發生度，由 (涵蓋 90% 案例 RTI 值) — (涵蓋 10% 案例 RTI 值) 比較四種 CL 分布範圍，數值大者即模糊區域越大，代表用於辨識土石流發生的效果較差。四種 CL 線值區間分別： CL_0 為 5,619、 CL_1 為 13,251、 CL_2 為 8,860、 CL_3 為 13,219，顯示 CL_0 分布區間最狹窄，其次為 CL_2 ，而以 CL_1 分布區間最廣。另由 CL_3 50% 之位置是否介於區段中間，可了解數值分布是否均勻分布，圖 9 中 CL_3 50% 與 CL_2 10% 完全重疊，而 CL_3 50% 明顯偏向 CL_3 90% 線，其餘 CL 大多位於中間位置，再由圖 9 之 CL_3 涵蓋 10% 至 90% 案例數值可知，雖 CL_3 50% 之值介於 1,300~3,000，但 CL_3 50% 以上之值卻介於 3,000~15,000，顯示 CL_3 分布極不均勻，代表部分土石流案例發生時 CL_3 50% 之 RTI_3 值仍偏低，此主因 CL_3 較其他反應時間長，需降雨後一至兩日才達到峰值。另由土石流發生三條件之充足水量條件，應與降雨量及洪峰流量關係較密切，又洪峰流量往往決定於第一、二筒流出量，因此以 CL_1 與 CL_2 值較適合作為土石流警戒基準值。而模式中第三筒(H_3)儲留時間最長，往往需 10 天以上才能消退，較適合應用於需長期監測之地滑或深層崩塌區域，因此 CL_3 較適合做為需長期監測之地滑或深層崩塌的警戒指標。

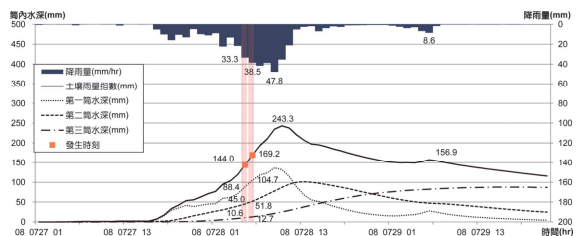
而以圖 10 中，土石流發生時刻之時雨量、第一、二、三筒水深值分布點進行迴歸，並計算採用皮爾森相關係數 R^2 (pearson correlation coefficient)。 R^2 用以分析時雨量、第一、二、三筒水深值與土壤雨量指數之線性關係強弱。 R^2 接近 0 並非代表兩者沒有關係，只是非線性相關， R^2 越大代表具明顯線性相關，正負號代表兩者屬正相關或負相關。結果顯示圖 10(c) 土壤雨量指數 SWI 與第二筒水深 H_2 之 R^2 達 0.85，呈現明顯線性關係， H_2 約為 SWI 之 0.3 倍，其餘三項分別為 0.24、-0.23、0.45，均小於 0.5，呈現非線性關係。由圖 10(c) H_2 與 SWI 之迴歸式與涵蓋 10% 案例之 $CL_2=2,878$ 臨界線之交點，可求解得到土壤雨量指數 $SWI=98.6\text{mm}$ 與第二筒水深 $H_2=29.2\text{mm}$ ，可應用於改良現行單筒式雨量筒，製作雙層式雨量筒，以第二層筒深度做為現場土石流預警及疏散機制參考。此外由表 4 所有案例可知， $SWI \geq 107.3\text{mm}$ 方有土石流案例發生，亦可視為警戒基準標準。

筒狀模式中第一、二、三筒水深值與土壤雨量指數於各時間點之數值，可構成土壤雨量指數動態曲線，7 場颱風事件之土石流案例所構成土壤雨量指數動

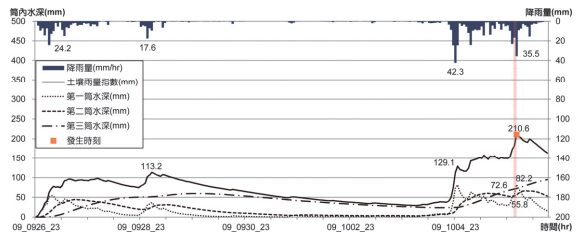
態曲線，並參考水土保持局劃定標準，套疊圖 9 成果中涵蓋 10%、50%、30% 及 90% 案例等四條曲線，如圖 11 所示。由案例中各動態曲線可發現其變化情形乃依循一定法則變化，配合表 1 筒狀模式方程式可推導出公式 (9) 至公式 (15)。其中，第一筒水深與土壤雨量指數形成 ρ 型移動，且當 I 符合公式 (9)、公式 (10) 及



(a) 聖帕颱風 (Typhoon SEPAT)



(b) 鳳凰颱風 (Typhoon FUNGWONG)



(c) 芭瑪颱風 (Typhoon PARMA)

圖 8 鳳義坑 (花縣 DF125) 颱風期間土壤雨量指數圖

Fig.8 SWI of Fengyikeng creek sub-basin (Hualien DF125) during typhoon

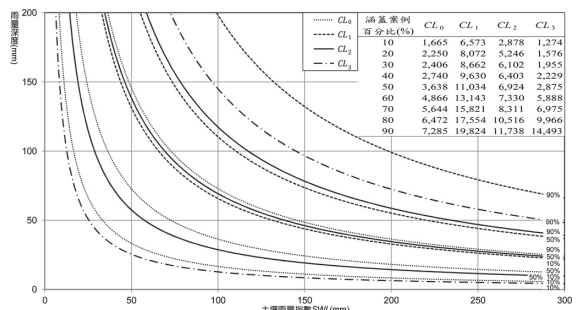


圖 9 土石流發生臨界線 CL 線分布圖

Fig.9 The probability distribution of Critical Line

公式 (11) 條件時，動態曲線呈現增加趨勢，反之為下降情形。第二筒水深與土壤雨量指數形成 I 型移動，當 H_1 符合公式 (12) 及公式 (13) 時呈現增加趨勢，反之

$$\text{當 } H_1 < L_1 = 15\text{mm} : I > 0.12 H_1 \quad (9)$$

$$\text{當 } H_1 > L_1 = 15\text{mm} : I > (0.22 H_1 - 1.5) \quad (10)$$

$$\text{當 } H_1 > L_2 = 60\text{mm} : I > (0.37 H_1 - 10.5) \quad (11)$$

$$\text{當 } H_2 < L_3 = 15\text{mm} : F_1 = 0.12 H_1 > 0.05 H_2 \Rightarrow H_1 > 0.4167 H_2 \quad (12)$$

$$\text{當 } H_2 > L_3 = 15\text{mm} : F_1 = 0.12 H_1 > (0.1 H_2 - 0.75) \Rightarrow H_1 > (0.8333 H_2 - 6.25) \quad (13)$$

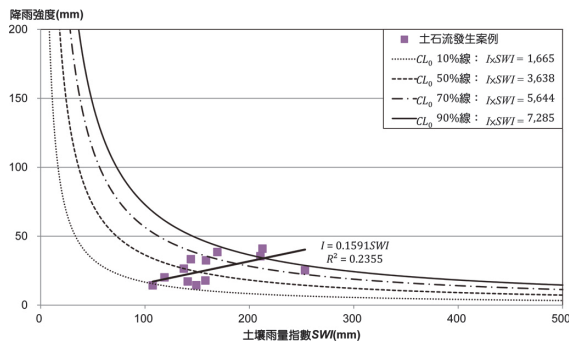
$$\text{當 } H_3 < L_4 = 15\text{mm} : F_2 = 0.05 H_2 > 0.01 H_3 \Rightarrow H_2 > 0.2 H_3 \quad (14)$$

$$\text{當 } H_3 > L_4 = 15\text{mm} : F_2 = 0.05 H_2 > (0.02 H_3 - 0.15) \Rightarrow H_2 > (0.4 H_3 - 3) \quad (15)$$

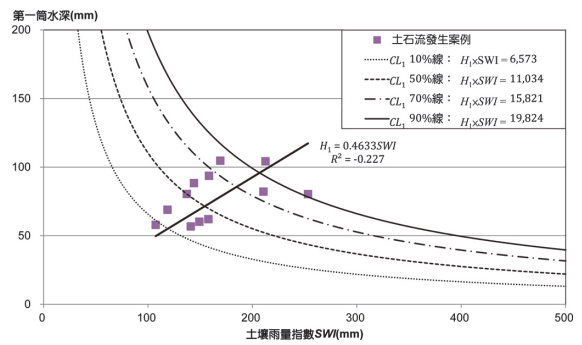
而第一筒水深—土壤雨量指數之圖中顯示大興及鳳義坑土石流案例中，三場發生於線段峰值上，其餘大多數發生於峰值前，且 H_1 值均大於 50mm。第二筒水深—土壤雨量指數之走勢幾乎為直線，與圖 10(c) 所發現線性關係之成果相佐，顯示由 H_2 與 SWI 所組成的

為下降。第三筒水深與土壤雨量指數形成反寫 β 型移動，當 H_2 符合公式 (14) 及公式 (15) 時呈現增加趨勢，反之為下降。

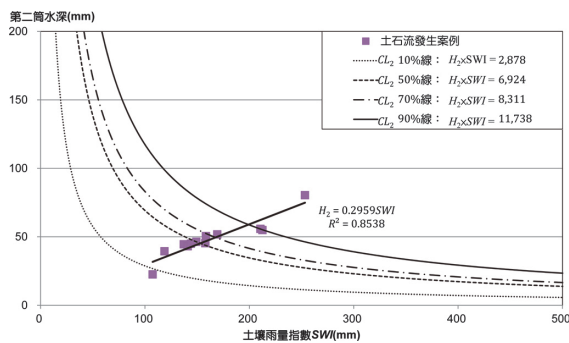
CL_2 值於土石流預警機制之應用性最高，且大多案例之 H_2 值大於 45mm，而鳳義坑所有案例更全趨近於 50mm，可作為雙層式雨量筒之土石流警戒值。此外，第三筒水深—土壤雨量指數之走勢凌亂，無法應用於土石流預警機制。總而言之，由前述各項成果顯示，



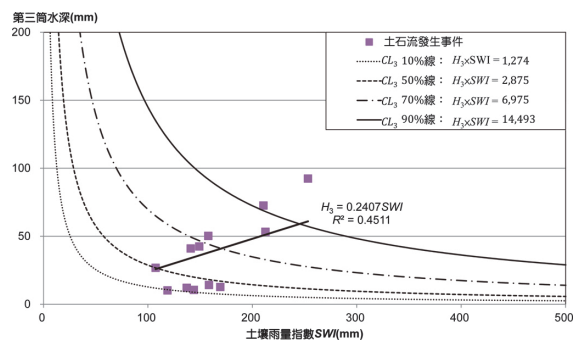
(a) 降雨強度與土壤雨量指數 (CL_0)



(b) 第一筒水深與土壤雨量指數 (CL_1)



(c) 第二筒水深與土壤雨量指數 (CL_2)



(d) 第三筒水深與土壤雨量指數 (CL_3)

圖 10 土石流發生時土壤雨量指數分布圖

Fig.10 Distribution of SWI when debris flow occurred (a) rainfall intensity and SWI (CL_0) (b) water depth of the first tank and SWI (CL_1) (c) water depth of the second tank and SWI (CL_2) (d) water depth of the third tank and SWI (CL_3)

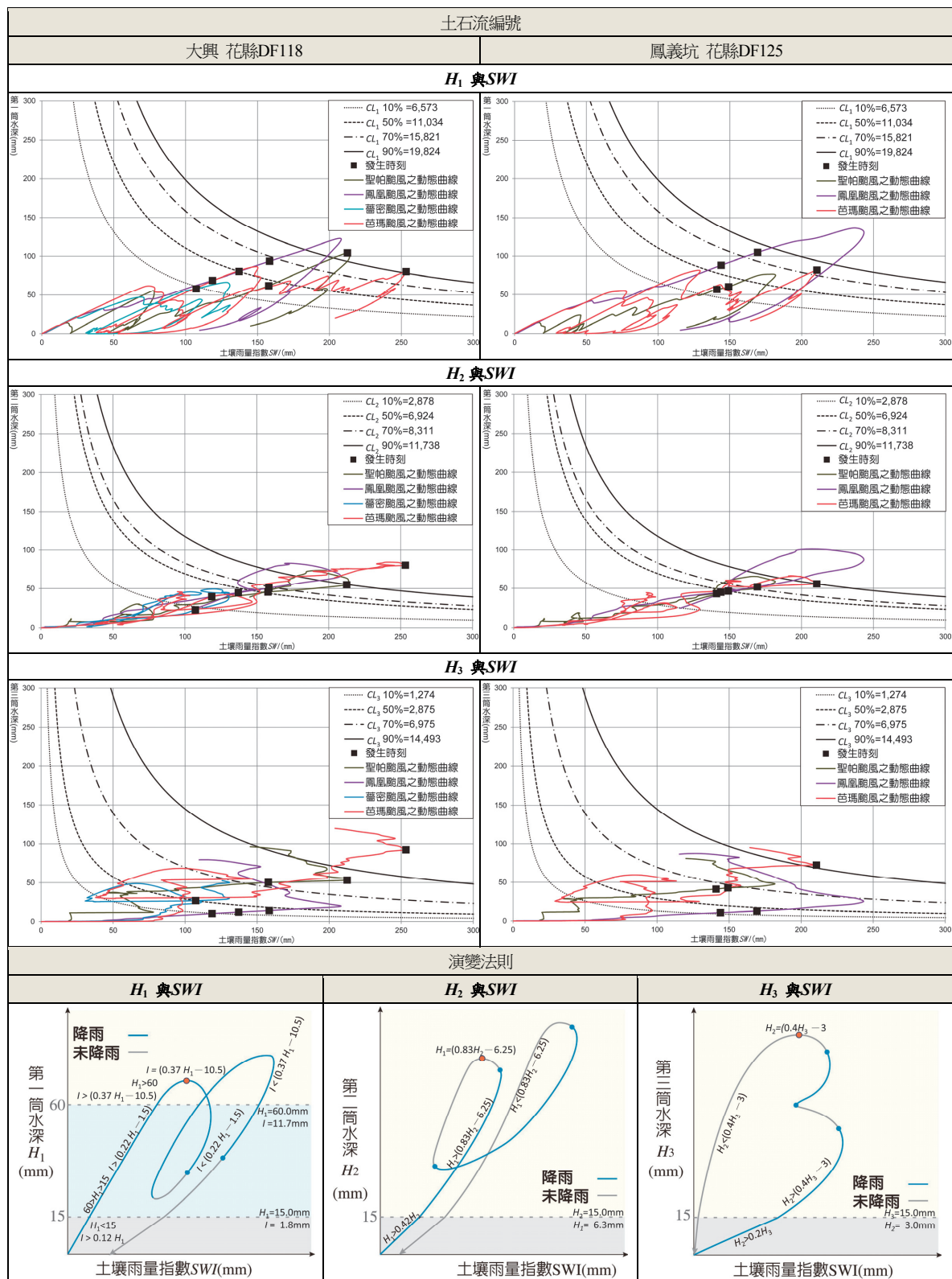


圖 11 土壤雨量指數動態曲線及演變法則

Fig.11 The Dynamic curve and evolution rule of Soil Water Index

由第二筒水深 H_2 所推得之 CL_2 值與土石流案例之相關性最高, 最適合做為建立土石流預警機制之指標。

由圖 8 與圖 11 可發現土石流往往發生於第一筒水深達峰值前, 顯示本研究案例中降雨量累積達到土石流發生啟動所需之臨界條件, 與柴田徹等人 (1984) 及鈴木雅一等人 (1979) 研究得知邊坡破壞案例分布於第一筒峰值至第二筒峰值不同, 此因其研究是以邊坡滑動為主, 發生機制主要受邊坡穩定機制與土壤含水量兩者控制, 問題較為單純。而土石流發生, 除受降雨、流量、邊坡穩定機制與邊坡土體含水量等因素外, 亦可能因河道土體堵塞迴水後潰決而導致土石流發生, 此部分則必須藉由比對模擬流量與觀測流量之差異, 方能了解其發生機制, 無法僅使用 SWI 值得知。由於土石流發生機制較為複雜, 因此本研究結果與柴田徹等人 (1984) 及鈴木雅一等人 (1979) 研究結論有所差異。

由於實際案例分析可發現當 $CL_2=2,878$ 時, 或當 $SWI=98.6\text{mm}$ 及 $H_2=29.2\text{mm}$ 時, 可涵蓋 10% 之土石流案例, 且由表 4 所有案例得知 $SWI>107.3\text{mm}$ 方有土石流發生, 因此建議以土壤雨量指數為 107mm 作為東部地區警戒參考, 並配合水保局現行 (2012 年 7 月訂) 花蓮縣光復鄉大興村及鳳林鎮鳳義里之土石流警戒基準值分別為 450mm 及 500mm, 以有效累積雨量是否達到土石流警戒基準值, 或土壤雨量指數是否超越 107mm 兩項, 做為疏散時機發布與即時疏散決策之參考。

最後本研究以探討土壤雨量指數對於台灣地區土石流潛勢溪流之特性為主, 因此目前以日本花崗岩參數進行分析, 然對於日本花崗岩參數應用於台灣之適用性, 須藉由眾多正確之時流量資料進行參數率定及成果比對與驗證, 且由於台灣之地質條件不同於日本, 因此對於後續研究者進行相關研究時, 建議須納入地質條件率定台灣之筒狀模式參數, 並進行成果比對與驗證。

五、結 論

本研究為了將地文因子納入坡地災害發生機制中, 故嘗試以日本筒狀模式花崗岩參數及 Osanai et al. (2010) 研究為基礎, 分析台灣東部鳳義坑及大興土石流觀測站記錄到所有土石流案例資料。結果顯示兩處觀測站所有發生土石流案例並非發生在單場降雨事件中最大雨量發生時刻, 而是在降雨發生後土壤達到一定含水量後, 此與岡田憲治 (2002) 所得結論相符。本

研究中 95% 案例發生在 $SWI=114.1\text{mm}$, 與柴田徹等人 (1984) 所得 97% 案例發生在 125mm 以上相似。本研究之土石流事件發生於第一筒水深達峰值前, 顯示本研究案例中降雨量累積達到土石流發生啟動所需之臨界條件, 與柴田徹等人 (1984) 及鈴木雅一等人 (1979) 之研究是以邊坡滑動所需之臨界條件不同, 主因土石流發生機制較邊坡滑動案例為複雜, 因此本研究結果與其研究結論有所差異。

由圖 9 中四種臨界線 (CL) 10% 以下區域代表低發生度, 90% 線以上區域代表高發生度, 而兩線間的模糊區域越大, 代表用於辨識土石流發生的效果較差。結果顯示 CL_0 之分布區間最狹窄, 其次為 CL_2 , 而以 CL_1 分布區間最廣。且案例中發現圖 11 之第二筒水深之動態曲線走勢幾乎為直線, 與圖 10(c) 中相關性為最高 R^2 達 0.85, 第二筒水深 H_2 為土壤雨量指數 SWI 之 0.3 倍之線性關係, 兩者成果相佐, 顯示 CL_2 於土石流預警機制之應用性最高。

本研究亦發現土壤雨量指數變化依循一定法則進行, 第一筒水深之動態曲線以 ρ 型移動, 第二筒水深之動態曲線以 I 型移動, 第三筒水深之動態曲線以反寫 β 型移動, 且由式 (9) 至式 (15) 控制其走向。由圖 11 顯示大興及鳳義坑土石流案例中, 三場發生於線段峰值上, 其餘大多數發生於峰值前, 且 H_1 值均大於 50mm、 H_2 值大於 45mm, 可作為雙層式雨量筒之土石流警戒值。

由於實際案例分析可發現當 $CL_2=2,878$ 時, 或當 $SWI=98.6\text{mm}$ 及 $H_2=29.2\text{mm}$ 時, 可涵蓋 10% 之土石流案例, 且由表 4 所有案例得知 $SWI>107.3\text{mm}$ 方有土石流發生, 因此建議以土壤雨量指數為 107mm 作為東部地區警戒參考, 並配合水保局現行 (2012 年 7 月訂) 花蓮縣光復鄉大興村及鳳林鎮鳳義里之土石流警戒基準值分別為 450mm 及 500mm, 以有效累積雨量是否達到土石流警戒基準值, 或土壤雨量指數是否超越 107mm 兩項, 做為疏散時機發布與即時疏散決策之參考。

由於台灣之地質條件不同於日本, 因此後續研究者進行筒狀模式或土壤雨量指數等研究時, 需考量台灣地質條件, 並率定台灣地質條件之筒狀模式參數, 而後進行分析。

誌 謝

本文承蒙行政院農委會水土保持局補助研究經費 (案號: 990510087), 僅此致謝。

參考文獻

- [1] 王光謙、劉家宏 (2005), 「數字流域模型」, 科學出版社。(Wang, G.Q., and Liu C.H. (2005). "The Digital Watershed Model." *Science Press*. (in Chinese))
- [2] 李光敦 (2007), 「流域整體治理規劃與淹水資訊系統建置計畫(2/3)」, 經濟部水利署水利規劃試驗所。(Lee, K.T. (2007). "Comprehensive watershed management planning and Flooding information system Build plan." *Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency*. (in Chinese))
- [3] 林李耀、陳建元、陳天健、王安翔、李清勝、張保亮 (2004), 「氣象雨量資料在土石流預警之應用」, 第八屆全國大氣科學學術研討會。(Lin, L.Y., Chen, C.Y., Chen, T.C., Wang, A.H., Lee, C.S., and Chang, P.L. (2004). "Meteorology rainfall data in the application of debris flow warning." *Eighth National Conference on Atmospheric Sciences in Taiwan*. (in Chinese))
- [4] 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, 34(4), 389-399。(Lin, M.L., Chen, T.C., Lin, H.C., and Yu, W.H. (2003). "Determination of Warning Criteria for Landslide in Taipei City." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 34(4), 389-399. (in Chinese))
- [5] 范正成、吳明峰 (2001), 「一級溪流土石流危險因子及其與臨界降雨線之關係」, 中華水土保持學報, 32(3), 227-234。(Fan, J.C., and Wu, M.F. (2001). Dangerous Factors of Debris Flow Occurrence of First Order Streams and Their Relationships with Critical Rainfall Lines. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 32(3), 227-234. (in Chinese))
- [6] 畢嵐杰 (2004), 「地表及地表下降雨－逕流模式之研究」, 國立中興大學土木工程學系博士論文。(Pi, L.C. (2004). A Study on Surface and Subsurface Rainfall-Runoff Model. Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University doctoral dissertation. (in Chinese))
- [7] 陳樹群 (1994), 「雙層筒狀模式在地下水吸附性污染物傳輸模擬上之應用」, 中國環境工程學刊, 4(2), 119-129。(Chen, S.C. (1994). Appline two-layer tank model to the transport of sorptive contaminant in groundwater. *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering*, 4(2), 119-129. (1994). (in Chinese))
- [8] 詹錢登 (2010), 「99 年土石流警戒基準值檢討與更新」, 行政院農業委員會水土保持局。(Jan, C.D. (2010). "Rainfall-Based Warning Criteria of Debris-Flow Occurrence." *Soil and Water Conservation Bureau*. (in Chinese))
- [9] 詹錢登、李明熹、黃婷卉 (2002), 「土石流發生降雨警戒值模式之研究」。(Jan, C.D., Lee, M.H., and Huang, T.H. (2002)s. Rainfall Threshold Criterion for Debris Flow Initiation. (in Chinese))
- [10] 謝正倫 (1991), 「土石流預警系統之研究」, 行政院農委會。(Shieh, C.L. (1991). "Study of debris flow warning system." *Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C.* (in Chinese))
- [11] 謝正倫 (1995), 「土石流預警系統之研究(第五年)」, 行政院農委會。(Shieh, C.L. (1995). "Study of debris flow warning system (fifth year)." *Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C.* (in Chinese))
- [12] 岡田憲治 (2002), 「土壤雨量指數」, 測候時報, 69.5。(Okada, K. (2002). Soil Water Index. *Weather service bulletin*, 69.5, 67-97. (in Japanese))
- [13] 菅原正巳 (1972), 「流出解析手法」, 共立出版社。(Sugawara, M. (1972). "Analytical method of outflow." *Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.* (in Japanese))
- [14] 鈴木雅一、福島義宏、武居有恆、小橋澄治 (1979), 「土砂災害發生の危険雨量」, 新砂防, 110, 1-7。(Suzuki M., Fukushima, Y., Takei, A., and Kobashi, S. (1979). The critical rainfall for the disasters caused by debris movement. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.31 No.3, Ser. No.110. (in Japanese))
- [15] 柴田徹、清水正喜、八嶋厚、三村衛 (1984), 「濱田市の土砂災害の實態と中場崩壊地の土質特性」, 昭和 58 年 7 月山陰豪雨災害の調査研究, 38-49 頁。(Shibata, T., Shimizu, M., Yashima, A., and Mimura, M. (1984). Disaster situation and soil characteristics of Landslide in Hamada. *Sanin heavy rain disaster investigation* (1983, 7). (in Japanese))
- [16] 瀬尾克美、船崎昌繼 (1973), 「土砂害(主に土石流的被害)と降雨量について」, 新防砂第 26 卷第 2 號 (通卷 89 号)。(Seo, K., and Funasaki, M. (1973). The amount of rainfall and soil pollution. *Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol.26 No.2, Ser. No.89. (in Japanese))

- [17] Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flow. *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.
- [18] 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.
- [19] Ishihara, Y., and Kobatake, S. (1979). Runoff Model for Flood Forecasting. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 29, Part 1. NO.260.
- [20] 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 Zatkun, R.S. (1987). Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall. *Science*, 238, 921-925.
- [21] Kuramoto, K., Tetsuga, H., Higashi, N., Arakawa, M., Nakayama, H., and Furukawa, K. (2001). A study on a method for determining non-linear critical line of slope failures during heavy rainfall based on RBF network. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, No.672, VI-50, 117-132, *Japan Society of Civil Engineers*.
- [22] Kuramoto, K., Noro, T., Osanai, N., Kobayashi, M., and Okada, K. (2005). A study on rainfall indexes for giving early warning information for sediment-related disasters. *Proceedings of Annual Research Meeting in 2005, Japan Society of Erosion Control Engineering*, 186-187.
- [23] Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S., and Noro, T. (2010). Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network. *Landslide* (2010) Volume: 7, Issue: 3, 325-338.
- [24] Wieczorek, G.F. (1987). Effect of Rainfall Intensity and Duration on Debris Flows in Central Santa Cruz Mountains. California, *Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, 7, 93-104.

2012 年 05 月 28 日 收稿

2012 年 08 月 31 日 修正

2013 年 03 月 04 日 接受

(本文開放討論至 2013 年 12 月 31 日)