

以水含量指標預測集水區內降雨誘發的淺層崩塌

陳振宇^{[1][2]*} 藤田正治^[2]

摘要 台灣及日本現行的土砂災害警戒系統均採用以雨量為指標的統計模式建置，惟此模式精度較差，且無法提供明確資訊，因此未獲地方政府及民眾信任。本研究採用斜坡單元為崩塌預測單元，整合物理模式法及多元迴歸分析，並以土壤水含量為指標，提出一新型態的集水區崩塌預測模式。此模式不僅可預測崩塌地點、時間及規模，亦有高速運算能力，同時也能估算坡面之降雨-逕流量，未來如整合其他模式，將可作為發展複合型土砂災害警戒系統之基礎。

關鍵詞：崩塌、預測、水含量、警戒系統、集水區尺度。

Predicting Rainfall-Induced Shallow Landslides in a Basin with a Water Content Index

Chen-Yu Chen^{[1][2]*} Masaharu Fujita^[2]

ABSTRACT The existing sediment disaster warning systems in Taiwan and Japan are established using a rainfall index based on a statistical model. However, because of the low warning hit rate and lack of definite warning information, they are not fully trusted. This study proposes a new landslide prediction model which adopts slope units as stability analysis targets and integrates a physically-based model and multiple regression analysis as well as used water content as an index for landslide prediction in a basin. The new model not only predicts the location, occurrence time, and scale of landslides but also offers high performance calculation. Moreover, it can also estimate the rainfall-runoff on a slope. If other sediment-related models are incorporated in the new model, it can serve as the foundation for developing a multi-hazard warning system.

Key Words : Landslide, prediction, water content, warning system, basin scale.

一、前言

台灣每年均飽受颱風豪雨侵襲，伴隨而生的土砂災害往往造成民眾生命財產的重大損失。因雨量造成的土砂災害的類型大致可分為崩塌、地滑、土石流三類；其中崩塌部份，近年來依其崩塌之規模及深度，又可分為「淺層崩塌」(shallow landslide) 及「深層崩塌」(deep-seated landslide)。儘管深層崩塌一旦發生，其災害規模可能超乎想像，但考量災害發生的頻率及分布範圍，淺層崩塌可能致災及造成人命傷亡的風險往往更無法忽略。此外，由於台灣的災害防救法，僅明列土石流災害為法定天然災害，所以目前國內的土砂災害警戒系統僅針對土石流發布警戒，尚未將崩塌警戒一併納入考量，因此，如何建立可應用於實務作業上的崩塌預測及警戒模式，係未來防災工作之重要課題。

一般對於土砂災害的預測及警戒模式，大致可分為統計模式 (statistical model) 法與物理模式 (physically-based model)

法二大類。其中統計模式法大多使用雨量等易於量測及取得的現地資料作為指標，經由歷史災例與雨量資料之統計，訂定崩塌或土石流發生之臨界雨量，例如 Wieczorek and Glade (2005) 曾蒐集世界各國以雨量為警戒指標的土石流警戒模式，以及日本與台灣現行的土砂災害警戒模式 (陳振宇，2013a)。統計模式法之優點為計算快速，可應用於降雨期間即時的廣域土砂災害警戒；但缺點為無法明確預測災害的類型、可能發生時間、地點及其規模 (陳振宇，2013a)。相對而言，物理模式法，則可明確提供災害可能發生的時間、地點及其規模的預測 (Xie et al., 2006 ; Tsutsumi and Fujita, 2008)；但缺點則是限於其計算費時，且現地參數蒐集困難等條件，一般只能使用於少數特定邊坡的警戒或災後分析，無法應用於流域尺度內的每一個坡面。

與台灣情況相似，日本每年颱風豪雨季節亦飽受土砂災害威脅，且早在 1984 年即以統計模式建立以雨量為指標的土砂災害警戒系統，並以降雨造成的土石流 (debris flow) 及淺層

[1] 行政院農業委員會水土保持局土石流防災中心

Debris Flow Disaster Prevention Center, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C.

[2] 京都大學防災研究所

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan.

* Corresponding Author. E-mail : cychen59@gmail.com

崩塌 (slope failure/shallow landslide) 為警戒標的，惟不包含地滑 (landslide)(Osanai et al., 2010)。在警戒模式方面，日本使用徑向基底函數網路 (Radial Basis Function Network, RBFN)，配合解析度 1km 的網格式雷達解析雨量資料 (Radar Automated Meteorological Data Acquisition System analytical rainfall, RA-MeDAS analytical rainfall) 以統計模式建立警戒臨界線，並以邊長 5km 之網格呈現該地區之土砂災害風險等級，以提供市町村政府進行疏散決策。儘管，日本現行的土砂災害警戒系統應用範圍較台灣的土石流警戒系統為廣，但在實務操作上，以 2008 至 2010 年的統計結果為例，由於警戒命中率 (Warning Hit Rate, WHR=警戒發布後才發生的災害件數/土砂災害總件數) 僅 58.8%，但警戒誤報率 (False Alert Rate, FAR=已發布警戒但實際未發生災害之市町村數/已發布警戒之市町村總數) 却高達 83.4%；同時，該系統僅提供邊長 5km 網格內的土砂災害風險等級資訊，對於第一線負責疏散決策的市町村政府而言，實務作業上確實難以決定應疏散之區域，因此當市町村政府接獲土砂災害警戒情報時，真正會下達疏散指令的比例僅有 9.8%，且其中 58.9% 是災害已經發生後才下達 (岡本敦等，2012)。

由日本近年來土砂災害警戒發布與實際疏散比例的落差來看，現行僅以雨量為基準的統計模法式，並未能滿足第一線負責疏散決策的市町村政府於實際作業上之需求，亦即此警戒系統並未獲得地方政府防災決策單位之信任。為了解台灣土石流警戒系統之現況，陳振宇 (2013a) 曾統計 2007-2011 年之資料，結果顯示台灣土石流警戒系統之警戒命中率為 45.4%，警戒誤報率 75.2%，警戒區之疏散率為 51.6%。相較台日二國之統計結果，警戒命中率以日本較高，警戒誤報率則以台灣較低，而在警戒發布後的疏散率方面，台灣則明顯高於日本甚多，其原因在於台灣的中央災害應變中心會強制要求地方政府針對已發布土石流警戒之地區進行疏散作業，但日本則完全尊重地方政府自己的判斷與決策。為了解台灣地方政府及警戒區內民眾進行疏散避難之決策因子，陳振宇 (2013b) 使用 AHP 問卷訪談方式進行調查；結果顯示，不論是地方政府或是警戒區內之民眾，土石流警戒均非未被列入疏散決策時最重要的前三項因子內，亦即現行以雨量資料進行統計模式所建立的土石流警戒系統亦未獲得足夠之信任。同時，該研究亦發現對於地方政府而言，「提高警戒命中率」及「縮小警戒發布範圍」被認為是未來如要改進現行土石流警戒機制時，最重要的二項改進方向；亦即是否能較精確地預測土砂災害可能發生的時間與位置，對於後續執行疏散避難等相關防災作為，是最迫切需要的資訊。

因此，由台日二國現行土砂災害警戒系統已逾 10 年以上實務操作的現況來看，以統計模式法建立之土砂災害警戒系統，在實務應用上確實已遭遇瓶頸。所以近年來，亦有不少研究利用簡化的降雨入滲模式，結合無限邊坡穩定分析理論，建立以物理模式為基礎的流域尺度之崩塌預測模式；其中許多研究常使用格網 (grid-based) 作為分析單元 (Casadei et al., 2003； Chang and Chiang, 2009； Lee and Ho, 2009)，此法雖然具有較易建構與管理地形模型，以及演算法較為快速、程式

撰寫簡便等的優點，但同時也造成無法保留原地質、地形及其他環境等邊界條件特性的缺點 (Xie et al., 2004)；所以近年來已有部份研究採用斜坡單元 (slope unit) 為分析單元，針對各個斜坡單元進行崩塌危害評估 (Carrara et al., 1991； Crosta et al., 2006) 及崩塌預測 (Kubota and Nakamura, 1991； Wang et al., 2006； Xie et al., 2004)。

為解決現行統計模式之土砂災害警戒系統警戒命中率較低，且警戒分析與發布範圍太大的問題，本研究嘗試以物理模式為基礎，並以斜坡單元為崩塌分析單元，採用流域尺度發展一新型態之土砂災害警戒模式。為此，本研究提出一個新的警戒指標—臨界水含量 (Critical water content, W_{cr}) 作為降雨期間，快速評估流域集水區內各斜坡單元是否會發生崩塌的基準。此指標衍生於物理模式法之演算結果，並配合多元迴歸分析 (multiple regression analysis) 模式，不但保有物理模式法之明確物理意義，亦具有高速即時運算能力，除可用以模擬降雨期間流域內各斜坡單元之崩塌發生時間、地點及規模外，並可作為後續發展土砂災害警戒系統之基礎。

二、材料及方法

1. 斜坡單元劃分方式及研究區域

由於流域尺度內，斜坡單元之數量相當龐大，如以人工方式逐一劃設，恐曠日費時，因此本研究參考 Xie et al.(2004) 所提出的「集水區重疊」法，先以 GIS 軟體配合 DEM 數值地形資料，自動劃出一級河左右二側之斜坡單元；同時，本研究假設緊鄰河道且地表坡度小於 15° 處，不會發生崩塌，因此先以 GIS 軟體將此部份切除後，再依據坡向及修正後斜坡單元之形心位置的合理性決定是否再細切為數個較小的斜坡單元。其中，斜坡單元形心位置距其相鄰河道邊之垂直距離的二倍，將被用來代表該斜坡單元之斜面長度 (如圖 1(b))。

本研究之研究地區位於日本京都府宇治市志津川流域，流域面積為 10.8 km²，地質主要為砂頁岩互層，並依前述斜坡單元之劃分方式，使用 15m 之 DEM 將該流域劃分為 435 個斜坡單元 (如圖 2)。本研究假設所有的崩塌均侷限於基岩上方之土層，不會深入基岩，為便於後續崩塌之模擬與分析，每一個斜坡單元之土層均簡化為以 α 、 β 、 L 、 n 等 4 個獨立參數代表之簡化坡面 (如圖 3)，其中 α 為該斜坡單元之地表平均坡度， β 為基岩平均坡度， L 為坡面之水平投影長度， n 為坡面下游端土層厚度。所有斜坡單元的 α 及 L 均可由 GIS 軟體配合 DEM 資料自動計算出。此外，由現地調查發現，該地區之崩塌均為淺層崩塌，平均深度約為 2m，因此本研究設定研究區內所有斜坡單元 $\alpha=\beta$ ，且 $n=2m$ 。

本研究模擬之案例為 2012 年 8 月 14 日發生於志津川之豪雨災害，依據架設於宇治市役所之雨量站資料，降雨期間為 8/13 19:00~8/14 07:00，累積雨量 307mm，最大時雨量為 74mm/h，其中最大連續三小時雨量為 186mm (約為歷年最高紀錄的 1.6 倍)，為一典型強降雨類型 (京都府，2013)。由於研究區內並無地面雨量站，故本研究採用日本國土交通省之 X-BAND 雷達降雨資料，其空間解析度為 285m，資料間距為

1分鐘。X-BAND 系統係為短波長及多參數的雷達，故其時間及空間解析度都遠優於傳統之 C-BAND 雷達，且不須與地面雨量站作即時校正，但是觀測半徑只有 C-BAND 雷達的一半，僅約 60km，目前涵蓋範圍尚未遍及全日本。而在災害驗證資料部份，依據災後現場調查(京都大學防災研究所，2012)、空拍影像(Asia 航空株式會社，2012)，以及 2012/09/26 拍攝的 RapidEye 衛星影像 NDVI 模式判識結果，435 處斜坡單元中疑似有災後新增裸露地者計 38 處。同時，根據災後現場訪談當地民眾之調查結果，多數崩塌發生時間大約在 8/14 04:30~6:00 之間。

2. 邊坡穩定分析模式

本研究使用自行發展的 IRIS (Integrated Rainfall-Infiltration-Slope stability model, IRIS model) 模式進行邊坡穩定模擬與分析(陳振宇等，2014)。此模式分為降雨-入滲模擬、邊坡穩定分析及臨界滑動面分析等三個模組。其中降雨-入滲模擬模組採用 3 維 Richard's equation 來模擬土層中孔隙水的

入滲與流動，並使用有限元素法計算土層中每個有限元素法分析網格上之土壤孔隙水壓。接著邊坡穩定分析模組依據降雨-入滲模擬模組所求得的孔隙水壓，利用可分析任何形狀滑動面之簡易 Janbu 法進行計算，先將滑動土體分割成諸多垂直切片，再由應力平衡結果計算出邊坡穩定安全係數 F_s 。由於簡易 Janbu 法或 Spencer 法等切片分析方法，均需先自行假設多個可能之滑動面，分別計算安全係數後，再取安全係數最小之滑動面為臨界滑動面；然而，在此過程中缺少一客觀及標準程序，往往不易找到真正之臨界滑動面。為此，本模式採用動態規劃法(Dynamic Programming method, DP)結合變分法方式計算出安全係數最小之臨界滑動面。

為驗証 IRIS 模式對於單一邊坡降雨-入滲-崩塌之模擬成效，本研究選取研究區內斜坡單元 No.376 進行降雨-入滲-崩塌模擬(如圖 1(a))，依據現地調查結果，此坡面段崩塌時間約為 8/14 05:00 左右。模擬過程採用 X-band 雷達降雨資料，並取 7/1~8/12 期間之降雨資料為前期雨量，主要模擬期間為 8/13~8/14，模擬採用之時間間距為 1 分鐘。此外，模擬所使

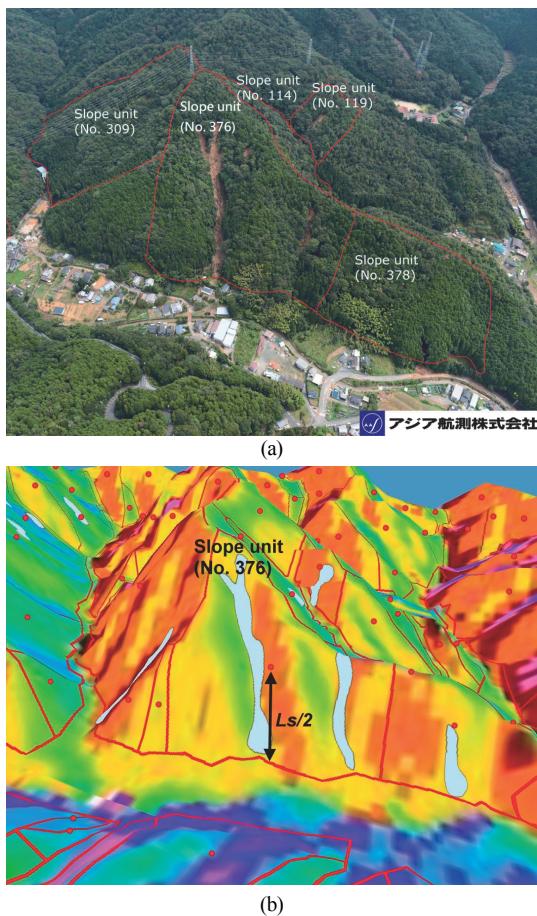


圖 1 (a) 斜坡單元 No.376 於 2012 年 8 月 14 日豪雨災後崩塌之航空照片 (修改自 Asia 航空株式會社，2012) (b) 斜坡單元及其坡向圖 (紅點係為該斜坡單元之形心)

Fig.1 (a)The aerial photo of landslide on the slope unit (No.376) after heavy rainfall event on August 14, 2012 [Modified from Asia air survey co., LTD, 2012] (b) The paradigm of the slope units and their aspect (the red dot is the centroid of the slope unit)

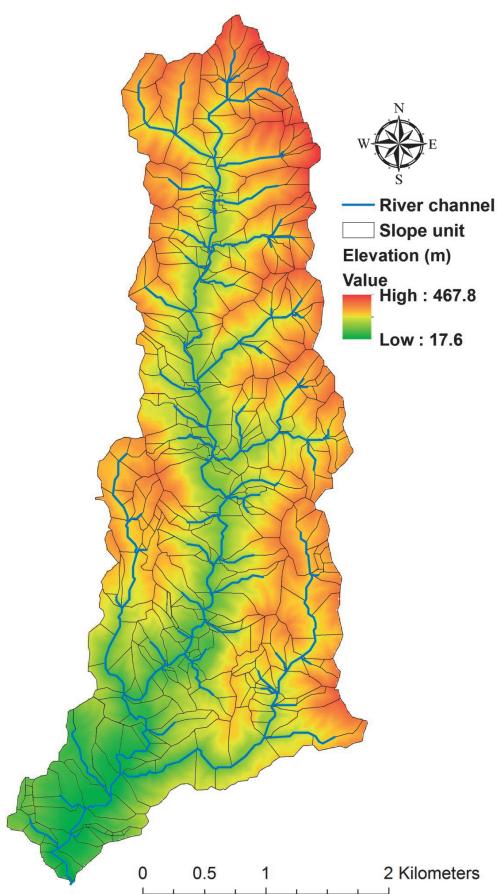


圖 2 研究區內之地表高程及單位斜面

Fig.2 The elevation and the distribution of the slope units in the study area

用之土壤相關參數係由現地取樣後，經室內土壤水分特性曲線及直接剪力試驗所得，其值如表 1，其中 θ_s (m^3/m^3) 為飽和水分含量 (saturated soil water content)， θ_r (m^3/m^3) 為殘餘水分含量 (residual soil water content)， ψ_m (m) 為土壤孔隙半徑中位數 (the median soil pore radius) 所對應之壓力勢能 (pressure potential)， σ 為描述土壤孔隙半徑分布範圍的無因次參數，土壤水分特性曲線之線形，主要受 ψ_m 及 σ 之影響， K_s (m/s) 為飽和土壤之水力傳導係數 (Kosugi, 1996)。模擬結果如圖 4 顯示，其中上圖為實際降雨資料與 IRIS 模式計算所得之單位寬度土層之水含量變化情形；下圖則顯示模擬之崩塌時間非常接近真實崩塌發生時間，但崩塌規模則略小於實際崩塌規模，推測應為模擬時係採安全係數小於 1 時即停止模擬，但實際崩塌可能是多階段崩塌所致。

α : the ground surface inclination

β : the bedrock inclination

L : the horizontal length of the slope

n : the thickness of downstream soil

L_s : the length of the slope

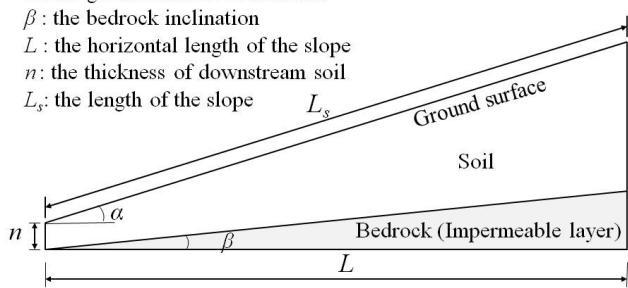


圖 3 應用於後續坡面穩定分析之簡化後斜坡單元模型

Fig.3 The simplified model of slope unit for the following stability analysis

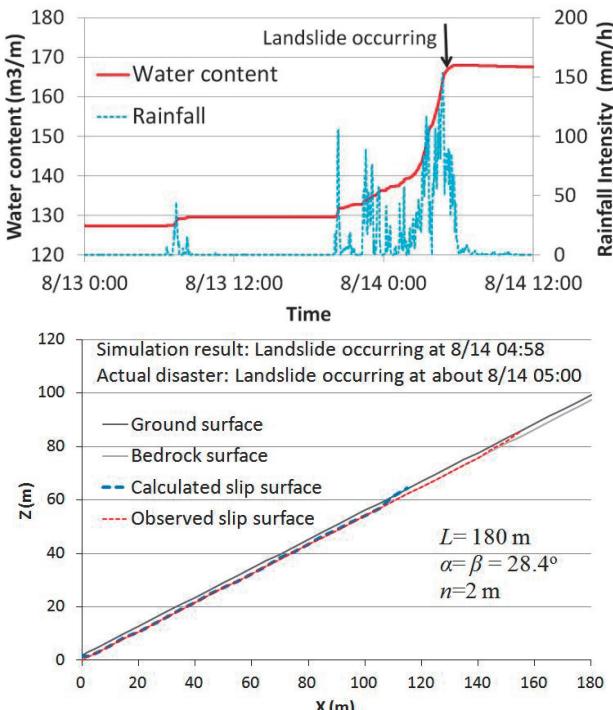


圖 4 斜坡單元 No.376 於 2012 年 8 月 14 日豪雨期間降雨-入滲-崩塌之模擬結果

Fig.4 The simulation of the landslide due to heavy rainfall on August 14, 2012 on the slope unit No.376

3. 崩塌發生時之土體臨界水含量

在使用 IRIS 模式模擬多種不同土層之降雨-入滲-崩塌案例過程中，陳振宇等 (2014) 發現同一坡面在不同降雨型態作用下，即使崩塌發生時間差異甚大，但崩塌發生時坡面上土體內之水含量卻幾乎相同，因此建議未來可嘗試發展以水含量為指標的崩塌預警方式。為驗證此一想法之可行性，本研究採用研究區內 435 個斜坡單元之地形參數的中值，製成如圖 3 所示之簡化坡面 (其中 $L=154m$, $\alpha=31^\circ$, $\beta=31^\circ$, $n=2m$)，並分別在 8 種固定強度之降雨類型 ($I=10\sim100mm/h$) 作用下，以 IRIS 模式進行降雨-入滲-崩塌模擬，模擬結果之崩塌發生時間、崩塌發生時之臨界水含量 (Critical water content, W_{cr}) 及崩塌規模如表 2。結果顯示，在不同降雨強度下，即便崩塌發生時間及規模差異甚大，崩塌發生時之臨界水含量卻相當接近；且模擬結果亦呈現降雨強度愈大，崩塌發生時間愈早，臨界水含量及崩塌規模愈小之趨勢。亦即使用臨界水含量作為崩塌發生與否之指標，應為可行。

4. 使用臨界含水量法進行崩塌預測

儘管 IRIS 模式可以有效模擬單一坡面之崩塌發生時間與規模，但由於採用有限素法計算土壤孔隙水壓變化時，相當耗時費力，實務上無法應用於流域尺度，因此本研究以 IRIS 模式先模擬出大量案例，再應用多元迴歸分析 (multiple regression analysis) 建立坡面上土體之初始水含量、崩塌發生時之臨界

表 1 志津川流域之土壤水力參數及剪力強度等參數

Table 1 Hydraulic characteristics and soil strength of the soil of the slope in the Shizugawa basin

Hydraulic parameters	K_s	θ_s	θ_r	ψ_m	σ
	cm/s	m^3/m^3	m^3/m^3	cm	-
Upper layer	0.0035	0.467	0.240	-31.2	1.40
Lower layer	0.0005	0.468	0.270	-23.7	1.17
		γ_{sat}	C	Ψ	
Soil strength		t/m³	tf/m²	degree	
		1.64	0.7	31	

表 2 單位寬度之簡化坡面在 8 種不同固定強度降雨類型下之臨界水含量及崩塌情形

Table 2 The critical water content of the simplified slope unit in unit width when the landslide occurred during 8 different rainfall patterns

Rainfall (mm/h)	W_{cr} (m^3/m)	Landslide occurring time (min)	Profile of the slip surface (m^2)
I=10	140.84	1359	123.25
I=20	140.77	809	77.42
I=30	140.45	638	68.25
I=40	140.06	556	68.25
I=50	139.74	509	68.25
I=60	139.41	479	68.25
I=80	138.84	445	57.42
I=100	138.20	427	57.42
mean	139.79	652.75	73.56
Standard deviation (SD)	0.936	311.16	21.11
SD/mean (%)	0.670	47.67	28.69

水含量、模擬期間之逐時水含量變化及崩塌規模之迴歸式，並據以判定降雨期間各斜坡單元是否會發生崩塌。本研究將此法簡稱為「臨界水含量法」(W_{cr} method)，其作法簡述如下：

- (1) 將集水區內之 435 個斜坡單元，依其坡面水平投影長度 L ，分成 8 個群組，每個群組選擇 1 個代表坡長 (representative slope length)，且每個群組依其實際之地表平均坡度分布之範圍，分別選取數個代表坡度 (representative slope)，間距為 1° 。其中第 7 及第 8 個群組因其斜坡單元數量較少，故直接選用實際斜坡單元之坡度作為代表坡度。最後以代表坡長及代表坡度之組合，製成 42 個虛擬坡面 (virtual slope)，如表 3。
- (2) 將此 42 個虛擬坡面分別以 8 種不同固定強度之降雨型態 (如表 2) 進行降雨-入滲-崩塌模擬，所有虛擬坡面之土壤相關參數同表 1。
- (3) 將上述模擬結果進行多元迴歸分析，分別獲得多元迴歸式 I、II、III、IV，並用此四式分別計算降雨期間的初始水含量 (W_{ini})、臨界水含量 (W_{cr})、逐時水含量 (W_t)，以及崩塌土方量 (V_s)。

表 3 42 組虛擬坡面之代表坡長及坡度

Table 3 The representative slope lengths and slopes for 42 virtual slopes

	Distribution of slope length (m)	Number of slope units	representative slope length (m)	representative slope (degree)
1	15.0~54.8	96	42	30~35 (6 sets)
2	54.9~94.5	138	74	30~37 (8 sets)
3	94.6~134.3	102	114	29~37 (9 sets)
4	134.4~174.0	44	154	29~34 (6 sets)
5	174.1~213.8	29	194	29~33 (5 sets)
6	213.9~253.5	18	234	29~32 (4 sets)
7	253.6~293.2	5	258, 259	28.7, 31.9(2sets)
8	293.3~333.0	3	299, 311	27.9, 31.8(2sets)

* Total are 42 virtual slope units

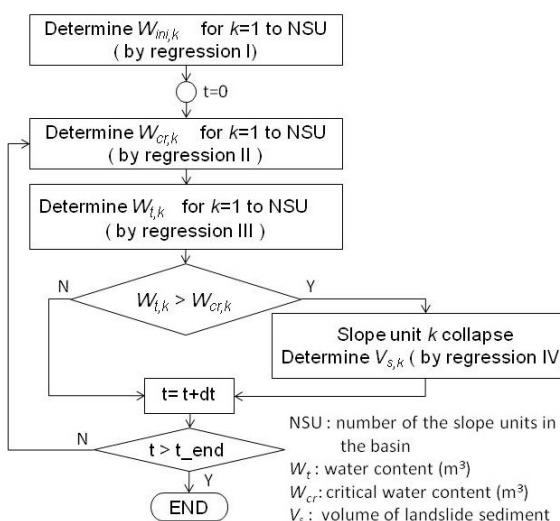


圖 5 臨界含水量法進行崩塌預測之流程圖

Fig.5 The flowchart of predicting landslides by W_{cr} method

- (4) 降雨期間，即時由多元迴歸式 I、II、III 計算水含量之變化，當某斜坡單元之水含量大於臨界水含量時 ($W_t > W_{cr}$)，則判定該斜坡單元發生崩塌，並以多元迴歸式 IV 計算出崩塌規模 (崩塌之臨界滑動面縱剖面面積)。由於 IRIS 模式僅採用二維動態規劃法計算臨界滑動面位置，故 IRIS 模式及多元迴歸式 IV，均只能推估崩塌之臨界滑動面縱剖面面積。經現地調查及衛星影像判識之結果發現，本研究區之崩塌寬度多在 10~30m 之間，本研究參考現地調查結果，假設所有崩塌寬度均為 20m，並據以計算出崩塌土方量。臨界水含量法預測斜坡單元是否崩塌之流程，詳如圖 5。

5. 多元迴歸式與其驗證

(1) 初始水含量 W_{ini} (Regression I)

由於不同初始水含量將會影響坡面穩定分析之結果，本研究為模擬自然狀況下，坡面土體水份分布情形，在使用 IRIS 模式進行崩塌模擬前，須進行初始含水量及前期雨量之設定，其設定步驟簡述如下：①設定整體坡面土體之初始壓力水頭均為 -0.01m，以三維 Richard's equation 進行 900 天的自然狀況降雨入滲模擬。②為避免排水過程中，土壤過份乾燥，900 天的模擬過程中均持續給予強度為 0.1mm/h 之降雨。③接著再給予研究區內實際之前期雨量 (2012/07/01~2012/08/12)，進行降雨入滲模擬。④所有進行 IRIS 模式之崩塌分析的坡面 (例如 42 個虛擬坡面及驗証用的真實坡面)，均需經過上述的初始水含量及前期雨量之設定後，方進行 IRIS 模式之降雨-入滲-崩塌分析。

由於同一坡面土體之初始水含量與土體體積及坡度相關，故初始水含量之多元迴歸式可表示為式 (1) 及式 (2)。並將前揭 42 個虛擬坡面之初始水含量模擬之結果進行多元迴歸，以求出其迴歸係數 (如表 4)。

$$\theta_{ini} = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha \quad (1)$$

$$W_{ini} = \theta_{ini} \cdot V \quad (2)$$

其中 $c_1 \sim c_3$ 為迴歸係數， L 為斜坡單元之水平長度 (m)， α 為斜坡單元之平均坡度 (deg)， θ_{ini} 為初始水含量比 (m^3/m^3)， W_{ini} 為該斜坡單位單位寬度之初始水含量 (m^3/m)， V 為該斜坡單元於單位寬度上的土層體積 (m^3/m)。為提高迴歸式之精度，迴歸係數依斜坡單元之水平長度分成四組不同數據。例如，當 $L \leq 95m$ 時，此組迴歸係數係由 14 個虛擬坡面 ($L=42m$ 及 $L=74m$) 在 8 種不同固定降雨強度下，進行降雨-入滲-崩塌模擬結果，執行多元迴歸分析而得。為驗証初始水含量 W_{ini} 回歸式 (Regression I) 之精度，本研究於研究區內選取 6 個實際的斜坡單位分別使用 IRIS 模式及 W_{ini} 回歸式進行初始水含量模擬，其結果如表 5。結果顯示，使用 W_{ini} 回歸式所求得之初始水含量與使用 IRIS 模式求得之初始水含量，二者誤差低於 0.1%，因此使用 W_{ini} 回歸式取代 IRIS 模式之作法應屬可行。

(2) 臨界水含量 W_{cr} (Regression II)

由於土體內之水含量與土體體積及坡度有關，且由表 2 可看出，崩塌時之臨界水含量會受降雨強度影響，因此，臨界水含量之多元迴歸式可表示如式 (3) 及式 (4)，並將前揭 42 個虛擬坡面分別以 8 種不同固定強度之降雨進行降雨-入滲-崩塌模擬之結果進行多元迴歸，以求出其迴歸係數 (如表 6)。

$$\theta_{cr} = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_{60} \quad (3)$$

$$W_{cr} = \theta_{cr} \cdot V \quad (4)$$

其中 I_{60} 為 60 分鐘降雨強度 (mm/h)， θ_{cr} 為臨界水含量比 (m^3/m^3)。為驗證臨界水含量 W_{cr} 迴歸式 (Regression II) 之精度，本研究亦於研究區內選取 6 個實際的斜坡單位分別使用 IRIS 模式及 W_{cr} 迴歸式進行降雨-入滲-崩塌模擬，其結果如表 7。

(3) 逐時水含量 W_t (Regression III)

由於土體中的水含量變化，不僅與土體體積 (坡長) 及坡度有關，也與降雨強度及當時的土體飽和度有關，因此逐時水含量之多元迴歸式可表示為式 (5) 及式 (6)，並將 42 個虛擬坡面在降雨延時為 60 小時的代表雨場作用下，以 IRIS 模式分別進行降雨-入滲-崩塌模擬所得的逐時水含量結果 (時間間距為 1 分鐘)，進行多元迴歸分析，以求得迴歸係數 (如表 8)。

$$d\theta_t = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_t + c_5 \cdot \theta_{t-1} \quad (5)$$

$$W_t = (\theta_{t-1} + d\theta_t) \cdot V \quad (6)$$

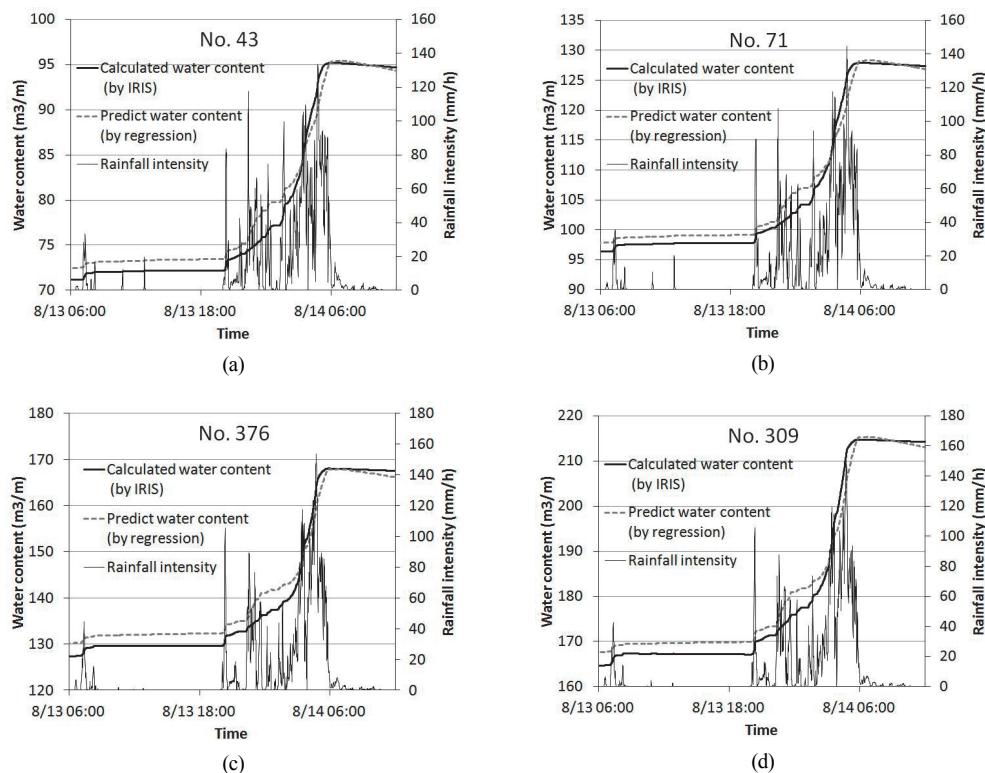
其中 I_t 為時間為 t 時的降雨強度 (mm/h)， θ_t 為時間為 t 時的土壤水含量比 (m^3/m^3)， θ_{t-1} 為時間為 $t-1$ 時 (即前一個時間間距) 的土壤水含量比 (m^3/m^3)， $d\theta_t$ 為水含量比的變化 (m^3/m^3)， W_t 為時間為 t 時在單位寬度的斜坡單元土體內的水含量 (m^3/m)。圖 6 顯示，使用 IRIS 模式及多元迴歸式計算之水含量 (W_t)，二者結果非常接近。

表 4 W_{ini} 迴歸式之迴歸係數Table 4 The regression coefficients of W_{ini}

	$L \leq 95 \text{ m}$	$95 < L \leq 185$	$185 < L \leq 255$	$L > 255 \text{ m}$
c1	0.318859	0.332008	0.336314	0.342907
c2	0.00027	7.47E-05	9.19E-05	0.000124
c3	0.000209	0.000319	6.26E-05	-0.00041

表 5 W_{ini} 迴歸式精度之驗證結果Table 5 The verification result of predicting W_{ini} by regression

No. slope	L (m)	α (deg)	W_{ini} (m^3/m) (by IRIS)	W_{ini} (m^3/m) (by Regression)	error (%)
31	29	34.3	19.35	19.36	0.09
192	71	33.3	49.01	48.99	-0.04
71	137	31.4	96.54	96.52	-0.02
413	165	29.5	116.70	116.74	0.03
406	214	32.2	153.12	153.23	0.07
136	299	27.9	220.70	220.52	-0.08

圖 6 使用 IRIS 模式及多元迴歸式計算之水含量 (W_t) 結果比較 (a) No.43 ($L=102\text{m}$, $\alpha=32.8^\circ$) (b) No.71 ($L=137\text{m}$, $\alpha=31.4^\circ$) (c) No.376 ($L=180\text{m}$, $\alpha=28.4^\circ$) (d) No.309 ($L=230\text{m}$, $\alpha=29.2^\circ$)Fig.6 The change of water content using the IRIS model and the regression formula (a)No.43 ($L=102\text{m}$, $\alpha=32.8^\circ$) (b) No.71 ($L=137\text{m}$, $\alpha=31.4^\circ$) (c) No.376 ($L=180\text{m}$, $\alpha=28.4^\circ$) (d) No.309 ($L=230\text{m}$, $\alpha=29.2^\circ$)

(4) 崩塌土方量 V_s (Regression IV)

表 2 顯示，崩塌規模 (滑動面剖面面積) 似乎與降雨強度成反比。事實上，降雨強度及延時將直接影響土體內孔隙水壓的分布情形，進而造成崩塌規模的差異，例如 Fujita and Tsutsumi (2008) 及 Dahal (2012) 之研究均指出長延時且高累積雨量之降雨型態易導致大規模

表 6 W_{cr} 迴歸式之迴歸係數Table 6 The regression coefficients of W_{cr}

	$L \leq 95\text{ m}$	$95 < L \leq 185\text{ m}$	$185 < L \leq 255\text{ m}$	$L > 255\text{ m}$
$c1$	0.54789	0.522459	0.553529	0.776762
$c2$	-0.00029	-3.1E-05	-8.2E-05	-2.5E-05
$c3$	-0.00212	-0.0019	-0.0026	-0.01065
$c4$	-9.3E-05	-0.0001	-0.00033	-0.00029

表 7 W_{cr} 迴歸式精度之驗證結果Table 7 The verification result of predicting W_{cr} by regression

No. slope	L (m)	α (deg)	I (mm/h)	W_{ini} (m^3/m) (by IRIS)	W_{ini} (m^3/m) (by Regression)	error (%)
31	29	34.3	40	26.87	26.87	0.00
192	71	33.3	40	64.36	64.38	0.03
71	137	31.4	40	124.55	124.55	-0.00
413	165	29.5	40	150.42	150.90	0.32
406	214	32.2	40	188.97	188.68	-0.16
136	299	27.9	40	277.34	275.38	-0.70

表 8 W_t 迴歸式之迴歸係數

Table 8 The regression coefficients of the water content

	$L \leq 95\text{ m}$	$95 < L \leq 185\text{ m}$	$185 < L \leq 255\text{ m}$	$L > 255\text{ m}$
$c1$	7.87E-05	8.22E-05	8.23E-05	9.05E-05
$c2$	9.33E-09	-1.5E-10	-7.4E-09	-9E-09
$c3$	1.12E-08	-4.2E-09	1.62E-08	5.44E-08
$c4$	6.37E-06	5.61E-06	5.22E-06	4.74E-06
$c5$	-0.00023	-0.00022	-0.00022	-0.00023

表 9 V_s 迴歸式之迴歸係數Table 9 The regression coefficients of V_s

	$L \leq 95\text{ m}$	$95 < L \leq 185\text{ m}$	$185 < L \leq 255\text{ m}$	$L > 255\text{ m}$
$c1$	2.580216	1.726502	0.646846	3.204391
$c2$	-0.00816	-0.00214	0.000756	0.00284
$c3$	-0.0467	-0.03181	-0.01912	-0.12285
$c4$	-0.00169	-0.00253	-0.00129	-0.00038

表 10 V_s 迴歸式精度之驗證結果Table 10 The verification result of predicting V_s by regression

No. slope	L (m)	α (deg)	I (mm/h)	W_{ini} (m^3/m) (by IRIS)	W_{ini} (m^3/m) (by Regression)	error (%)
31	29	34.3	40	40.25	39.09	-2.9
192	71	33.3	40	54.17	53.65	-1.0
71	137	31.4	40	64.40	64.38	23.5
413	165	29.5	40	70.00	110.14	57.3
406	214	32.2	40	50.25	61.55	22.5
136	299	27.9	40	433.25	365.36	-15.7

崩塌。因此，估算崩塌土方量之多元迴歸式可表示為式 (7) 及式 (8)。同前，將前揭 42 個虛擬坡面分別以 8 種不同固定強度之降雨進行降雨-入滲-崩塌模擬之結果進行多元迴歸，即以求出其迴歸係數，如表 9。

$$R_s = c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_{60} \quad (7)$$

$$V_s = R_s \cdot V \quad (8)$$

其中為 R_s 崩塌體積比 (m^3/m^3)， V_s 為該斜坡單元在單位寬度上的崩塌土方量 (m^3/m)，亦即滑動面之縱剖面面積。為驗証崩塌土方量 V_s 迴歸式 (Regression IV) 之精度，本研究於研究區內選取 6 個實際的斜坡單元分別使用 IRIS 模式及多元迴歸式推估崩塌土方量 V_s ，其結果如表 10。

三、結果與討論

1. 崩塌預測結果

使用前揭四組多元迴歸式，並採用 2012/08/12~08/14 之 X-band 雷達降雨資料， W_{cr} 法預測志津川流域在此降雨期間計有 187 處斜坡單元發生崩塌 (表 11)。與由衛星影像等判識為新增的 38 處裸露地相比，此 38 處新增裸露地中，有 28 處已被 W_{cr} 法預測為會發生崩塌，10 處則被預測為不會發生崩塌 (如表 11、表 12)。 W_{cr} 法預測之結果與 38 處裸露地之空間位置，詳如圖 7。此外，由 W_{cr} 法預測之崩塌時間集中在 8/14 04:34~05:39，此時段與災後調查訪談的結果非常接近。為便於與現行台灣及日本之土砂災害警戒系統比較，此處暫將警戒命中率 (Warning Hit Rate, WHR) 及警戒誤報率 (False Alert Rate, FAR) 之定義修改如下：

$$WHR = PCAC / AC \times 100\% \quad (9)$$

$$FAR = PCAC / PC \times 100\% \quad (10)$$

其中 $PCAC$ 為預測為崩塌且實際也發生崩塌之斜坡單元數目 (此處 $PCAC=28$)， AC 為實際發生崩塌之斜坡單元數目 ($AC=38$)， $PCAN$ 為預測崩塌但實際未崩之斜坡單元數目 ($PCAN=159$)， PC 為預測崩塌之斜坡單元數目 ($PC=187$)。因此，此案例中，警戒命中率 (WHR) 為 73.7%，警戒誤報率 (FAR) 為 85.0%。

此外，為呈現整體預測精度，此處定義崩塌預測精度 (the Accuracy of Landslide Prediction, ALP) 如下：

$$ALP = (PCAC + PCAN) / NSU \times 100\% \quad (11)$$

其中 $PNAN$ 為預測不會崩塌且實際也未崩塌之斜坡單元數目 ($PNAN=238$)， NSU 為全部斜坡單元數目 ($NSU=435$)。因此，此案例中崩塌預測精度 (ALP) 為 61.2%。

為驗證 W_{cr} 法是否確實能取代耗時費力的 IRIS 模式，以全面應用於流域內所有斜坡單元的崩塌預測，本研究選取了 8 個研究區內的真實斜坡單元 (其中 4 個為降雨事件中確實有發生崩塌者，另外 4 個則否)，分別進行 IRIS 模式及 W_{cr} 法的

崩塌預測，結果比較如表 13。結果顯示，使用 W_{cr} 法預測之崩塌發生位置與 IRIS 模式完全一致；在崩塌時間之預測方面，則與 IRIS 模式相當接近，僅在崩塌規模之預測上差異較大。

2. 崩塌可能性

由於崩塌與土體內之水含量多寡有直接關係，因此各斜坡單元於降雨期間任意時間 t 之崩塌可能性 (Probability) 可表示為式 (12)

$$\text{Probability} = (\theta_t - \theta_r) / (\theta_{cr} - \theta_r) \quad (12)$$

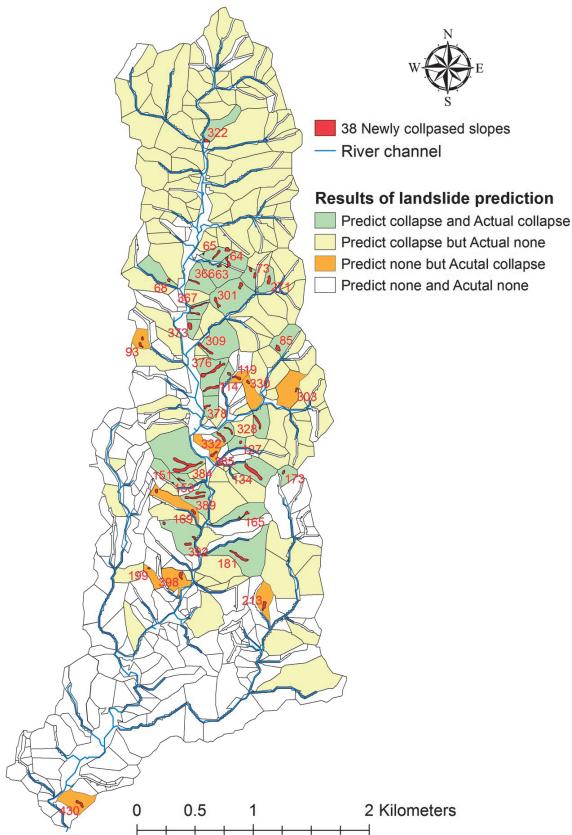


圖 7 W_{cr} 法於志津川流域內之崩塌預測結果與實際崩塌情形之比較

Fig.7 The result of comparing prediction with actuality for the landslides in the Shizugawa basin

其中 θ_t 為時間為 t 時的土壤水含量比 (m^3/m^3)。由於 θ_t 及 θ_{cr} 均可利用多元迴歸式快速計算，故降雨期間流域內所有的斜坡單元均可即時計算出其崩塌可能性。如將此結果以圖形方式即時展示於 GIS 平台，將可作為地方政府防災單位進行疏散決策的重要依據。圖 8 為 2012 年 8 月 14 日豪雨期間志津川流域 04:00~12:00 間各時段的崩塌可能性圖。

表 11 W_{cr} 法崩塌預測結果與實際崩塌處數之比較

Table 11 The comparison of prediction and actual landslides by W_{cr} method

	Number of slope units	Prediction	
		Collapsed	Non-Collapsed
Actual Event	Collapsed	28	10
	Non-Collapsed	159	238

表 12 W_{cr} 法針對 38 處新增裸露地之崩塌預測結果

Table 12 The prediction results of 38 newly collapsed slope unit by W_{cr} method

No. slope	No.	L (m)	α (deg)	No. channel	Predict collapse time	No. slope	No.	L (m)	α (deg)	No. channel	Predict collapse time
1	384	259	31.9	109	03:34	20	389	156	28.7	111	05:17
2	322	190	32.5	87	03:59	21	153	134	28.3	40	05:24
3	134	228	30.8	36	04:34	22	332	120	26.7	89	05:24
4	309	230	29.2	84	04:38	23	127	82	25.9	35	05:25
5	366	200	31.8	101	04:40	24	165	124	29.2	42	05:26
6	301	258	28.7	80	04:43	25	151	86	26.4	40	05:28
7	367	121	36.3	102	04:43	26	373	96	26.7	103	05:30
8	392	223	31.8	113	04:43	27	378	124	25.2	106	05:34
9	68	86	32.5	19	04:49	28	173	113	25.9	44	05:39
10	328	209	27.5	88	04:53	29	199	58	29.3	50	-
11	181	211	29.4	46	04:55	30	330	126	20.4	88	-
12	64	118	32.3	18	05:01	31	93	118	21.1	27	-
13	73	108	32.0	21	05:01	32	119	77	23.7	32	-
14	376	180	28.4	105	05:03	33	385	63	25.5	109	-
15	63	140	29.2	18	05:10	34	303	278	25.5	81	-
16	271	161	28.4	70	05:10	35	213	150	26.2	55	-
17	85	126	28.8	25	05:11	36	169	78	27.4	43	-
18	65	128	29.2	18	05:13	37	398	152	28.8	116	-
19	114	80	27.3	32	05:17	38	430	225	18.3	126	-

表 13 使用 IRIS 模式與 W_{cr} 法預測崩塌之結果比較

Table 13 The comparison of landslide prediction by the IRIS model and the W_{cr} method

Case	No. Slope	L (m)	α (deg)	Actual collapse	Calculated by IRIS model		Predict by regression		Difference of occurring time (min)	Difference Slip surface area (%)
					Occurring time	Slip surface area (m^2/m)	Occurring time	Slip surface area (m^2/m)		
1	367	121	36.3	Y	8/14 4:31	23.5	8/14 4:43	31.8	12	35.0
2	366	200	31.8	Y	8/14 4:31	51.3	8/14 4:40	64.4	9	25.5
3	134	228	30.7	Y	8/14 4:42	74.8	8/14 4:34	73.8	-8	-1.4
4	309	230	29.2	Y	8/14 4:41	115.4	8/14 4:38	101.9	-3	-11.7
5	192	71	33.3	N	8/14 5:35	54.2	8/14 5:30	42.5	-5	-21.6
6	43	102	32.8	N	8/14 4:46	44.0	8/14 5:02	60.4	16	37.5
7	71	137	31.4	N	8/14 4:43	63.1	8/14 5:00	66.6	17	5.4
8	424	248	28.4	N	No collapse		No collapse		same	

3. 討論

一般以物理模式為基礎的流域尺度崩塌預測模式，常使用格網 (grid-based) 作為分析單元，但此種分析模式因採用無限邊坡穩定分析法，因此只能用於淺層崩塌的分析。相對而言，IRIS 模式則不但可分析淺層崩塌，亦可分析深層崩塌 (陳振宇等，2014)。然而，由於 IRIS 模式之計算費時，不易應用於流域尺度之崩塌預測，因此本研究藉由整合 IRIS 模式及多元迴歸分析，同時採用土層之臨界水含量作為崩塌評估指標，提出

了一個流域尺度的新型態崩塌預測模式—臨界水含量 (W_{cr}) 法。此法具有以下優點：

- (1) 此法係針對流域內每一塊斜坡單元分別模擬其水含量之變化，如土體內水含量大於臨界水含量即判定為發生崩塌，並評估其崩塌土方量。因此，此法可即時預測流域尺度內之崩塌位置、時間及規模。
- (2) 相較於一般以雨量為指標的統計模式法，此法係由物理模式法 (IRIS 模式) 衍生而來，且以坡面內土壤水含量為指標，仍保物理模式法之優點，具有明確之物理意義。

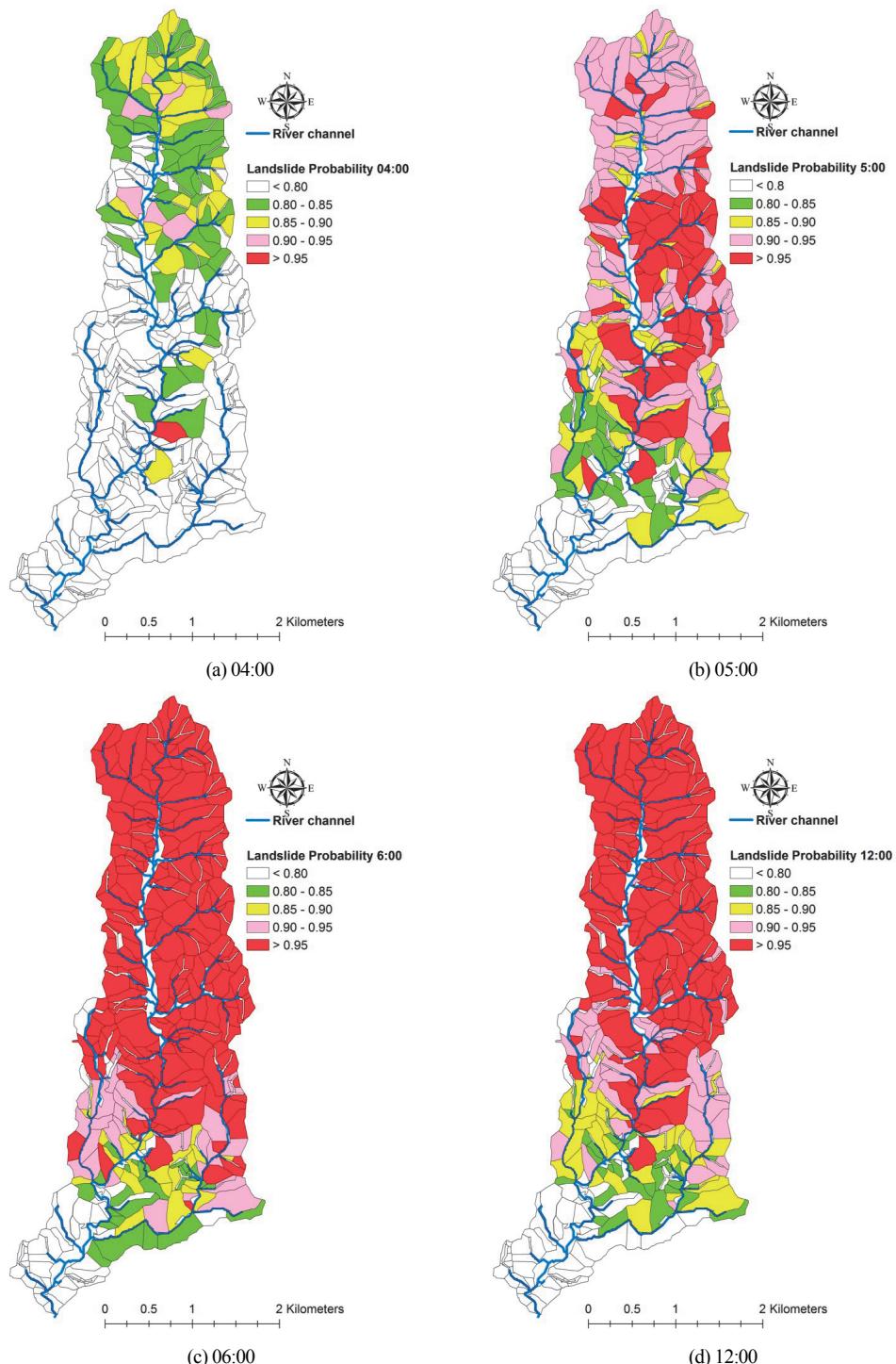


圖 8 2012 年 8 月 14 日豪雨期間志津川流域各時段崩塌可能性圖

Fig.8 The distribution of landslide probability in Shizugawa basin from 4:00 to 12:00 on August 14, 2012

- (3) 本法由於計算時僅使用簡單的多元迴歸式，因此計算快速，可直接應用於流域尺度之崩塌預測。
- (4) 由於土體內之水含量多寡與坡面安定性關係密切，因此非常適合使用水含量表示崩塌可能性；如以 GIS 平台直接圖形化展示流域內每一塊斜坡單元之崩塌可能性，將有助於地方政府防災單位進行疏散決策及相關應變措施。
- (5) 一般而言，如使用統計模式法來劃定某地區之土砂災害降雨臨界線 (critical line) 時，除大量的雨量資料外，尚需較多歷史災例資料才能劃定。然而，實務上並非每個地區都能蒐集到歷史災例資料。相對而言，此法僅需少數災例資料用以驗證預測結果，即使對於沒有歷史災例資料的地區，也能直接以現場調查或室內試驗所得的結果，設定土壤相關參數，進行模擬與預測。因此，此法可輕易地應用於任何地區。

然而，儘管 W_{cr} 法具有上揭眾多優點，但後續仍有一些問題，尚待進一步研究：

- (1) 雖然 Xie et al. (2004) 已提出自動化劃設斜坡單元的「集水區重疊」法，但對於地質或地形較複雜的地區，人工切割或調整斜坡單元仍是無法避免的工作。因此，如何降低人工作業比例，並維持成果的一致性，值得進一步探索。
- (2) 一般而言，因降雨造成之崩塌規模多與土體內之孔隙水壓分布型式有關。而降雨入滲過程中，影響土體內孔隙水壓分布情形的原因十分複雜，不單與地質、地形、坡長及坡度有關，也與降雨強度、降雨延時等有密切關連。本研究目前僅以 60 分鐘雨量強度 I_{60} 作為崩塌土方量預測迴歸式的雨量參數，相較於其他三個多元迴歸式，此部份之預測精度明顯不足，尚待進一步研究。
- (3) 由於本研究使用二維動態規劃法計算臨界滑動面位置，故 IRIS 模式及多元迴歸式 IV，均只能推估崩塌之臨界滑動面縱剖面面積，在崩塌寬度方面係採用現地調查結果之平均值 (20m)，因此崩塌土方量之估算結果與實際情形恐有落差，此部份仍待後續改進。

一般而言，當警戒系統使用較大的預報發布單元 (例如台日現行之土砂災害警戒系統分別使用村里及鄉鎮為預報發布單元)，其警戒命中率 (WHR) 及警戒誤報率 (FAR) 較易達成較佳之結果。本研究在使用較小的預測單位(斜坡單元)之情況下，以 W_{cr} 法預測崩塌之警戒命中率 (WHR=73.7%) 仍遠高於台日現行土砂災害警戒系統近年來之平均值 (45.4~58.8%)，而警戒誤報率 (FAR=85.0%) 則與台日現行土砂災害警戒系統近年來之平均值 (75.2~83.4%) 相近，因此， W_{cr} 法在崩塌預報精度方面，係優於台日現行之土砂災害警戒模式，此部份須再藉由增加降雨事件案例及增加不同區域案例進行驗證。

此外，由於本研究將所有斜坡單元均簡化為四個獨立參數的簡化坡面模型 (如圖 3)，且基於研究區內均為淺層崩塌及土層厚度相等的假設 ($\alpha=\beta$ ，且 $n=2m$)，進一步化簡為坡長 L 及地表坡度 α 等二個獨立參數，亦即已忽略坡面之地表起伏、不同地區之土層厚度與地表植生差異等的細部特性，此部份勢必

會造成一些誤差，影響預測結果。例如，由圖 7 可看出，造成警戒誤報率偏高 (亦即預測會發生崩塌，但實際未發生) 的斜坡單元，大多集中在流域的北部地區，其原因係本次事件之的降雨量係由北而南逐漸遞減 (如圖 9)，但本研究對於整個流域採用相同的土壤強度參數及土壤厚度，因此當流域中部之預測結果與實際崩塌情形大致相符時，降雨量較大的北部地區則易出現警戒誤報率偏高之情形。針對此種情形，如果先將流域分成數個區域，分別設定不同的土壤強度及土層厚度等參數，應可進一步降低警戒誤報率。

另一值得注意的是，本次模擬案例中，在 38 處由衛星影像或空拍影像等判識而得的災後新增裸露地中，有 10 處未能被 W_{cr} 法判定為發生崩塌。進一步分析此 10 處斜坡單元之地形資料，發現多為平均坡度小於 27.5° 的緩坡 (8 處)，或是坡面水平長度僅 58m 的小坡面 (1 處)。由於這 9 處新增裸露地之位置，並無解析度較高的空拍影像，均係由解析度 5m 之 RapidEye 衛星影像判識而來，因此推測此 9 處亦有可能僅為坡面土壤沖蝕，而非崩塌，此部份尚需進一步現勘或取得高解析度之影像方能確認。此外，另有一處未能被 W_{cr} 法判定為發生崩塌的新增裸露地，則位於流域最南端，雷達解析之累積雨量僅 134mm 處，此部份經現勘確認其崩塌位置位於志津川區民運動場旁之坡面，可能與人為開發有關。

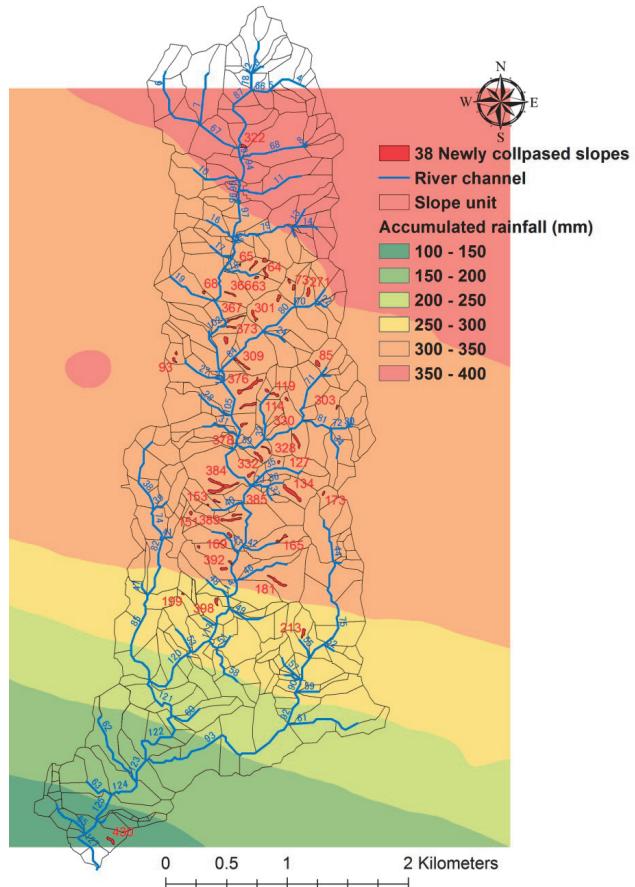


圖 9 志津川流域 2012 年 8 月 14 日豪雨事件累積雨量分布情形

Fig.9 The difference of rainfall distribution in the heavy rainfall event on August 14, 2102

多數研究在模擬流域之坡面降雨-逕流時，常使用計算簡便之動力波 (kinematic wave) 法 (*Takasao and Shiiba*, 1988; *Egahsira and Matsuki*, 2000)。動力波法雖易於藉由調整各層土厚及透水係數等參數，達到與預期洪峰一致之模擬結果。惟其缺乏明確之物理意義，且多僅適用於降雨期間之模擬。相對而言，本研究所提出之 W_{cr} 法係直接由土壤水份曲線模擬所有斜坡單元土層內之水含量變化，如利用水平衡之概念 (降水量-流出量=儲留量)，即可間接計算出降雨期間之坡面逕流量 (runoff)，即使於非降雨期間，也能合理描述坡面逕流，同時亦兼具計算快速之特性，應為另一可行方向。

四、結論

儘管災害發生前適時發布預警，並執行民眾之疏散避難，已被公認為降低災害衝擊之最重要的對策之一，但如何在不擾民與維護民眾安全的前提下，適時作出疏散避難決策，卻是一直困擾地方政府決策單位與當地民眾的難題。台灣及日本現行之土砂災害警戒系統，由於直接使用短期及長期雨量指標作為警戒發布之依據，並未考量地質、地形、水文等因素，故僅能提供廣域之警戒訊息，無法明確告知災害可能發生之時間與地點，在實務上，不論對地方政府或是當地居民而言，在疏散避難之決策上助益不大，此點也反映在近年來土砂災害警戒發布後，實際進行疏散行動比例偏低之事實。本研究所提流域尺度之崩塌預警模式—臨界水含量 (W_{cr}) 法，由於已納入地質、地形及水文條件，且能預測各斜坡單元之崩塌發生時間、地點、規模，甚至模擬坡面之降雨-逕流過程，後續如能整合流域內之崩塌土方運移模式、河道流量估算模式、河道內土砂流出模式、河床高程變化評估模式、河道水位估算模式等，即可進一步發展為流域尺度之複合型土砂災害預測模式。如再進一步納入民宅或公共設施位置、道路、橋梁等空間資訊，即可作為發展流域尺度之複合型災害警戒系統之基礎，除可提供災害期間之警戒發布與疏散決策之依據外，亦可作為平時防災疏散計畫驗證之模擬平台。

參考文獻

- [1] アシア航空株式會社 (2012)，「平成 24 年 8 月近畿豪雨災害斜め空中写真」。(Asia air survey co., LTD (2012). The aerial photos on the Shizugawa basin, Uji, Kyoto Prefecture after heavy rainfall event on August 14, 2012. (<http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID4T3J5OYFD/>)
- [2] 江頭進治、松木敬 (2000)，「河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法」，水工学論文集，44，735-740。
(*Egashira, S., and Matsuki, K.* (2000). "A method for predicting sediment runoff cased by erosion of stream channel bed." *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, 44, 735-740. (in Japanese with English abstract))
- [3] 京都大學防災研究所 (2012)，「2012 年 8 月宇治水害調査速報(流域災害研究センター)」。(Disaster Prevention Res. Inst (DPRI)., Kyoto Univ. (2012). Investigation report for the heavy rainfall disaster on August 13-14, 2012. (in Japanese)). (http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/disa ster_report.html)
- [4] 京都府 (2013)，「平成 24 年 8 月 13~14 日京都府南部豪雨災害被害の状況」，木津川・桂川・宇治川流域河川整備計画検討委員会第 11 回資料。(Kyoto Prefecture (2013). Disaster report for the heavy rainfall on August 13-14, 2012. (http://www.pref.kyoto.jp/shingikai/kasen-03/documents/1_n ambugouu.pdf)(in Japanese))
- [5] 岡本敦、富田陽子、水野正樹、林真一郎、西本晴男、石井靖雄、千葉伸一 (2012)，「土砂災害警戒避難に関するデータ解析共同研究」，國土技術政策総合研究所，日本。(Okamoto, A., Tomita, Y., Mizuno, M., Hayashi, S., Nishimoto, H., Ishii, Y., and Chiba, S. (2012). *The data analysis regarding the warning and evacuation information against sediment-related disaster*. National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM), Japan. (in Japanese))
- [6] 陳振宇 (2013a)，「以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估—以台灣及日本為例」，中華水土保持學報，44(1)，50-64。(Chen, C.Y. (2013a). "Evaluation of Rainfall-Based Sediment Disaster Warning Systems: Case Studies in Taiwan and Japan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (1), 50-64. (in Chinese))
- [7] 陳振宇 (2013b)，「土石流潛勢地區地方政府及民眾之疏散決策因子」，中華水土保持學報，44(2)，166-179.(Chen, C.Y. (2013b). "The Factors of Evacuation Decisions for Local Governments and Inhabitants in Debris-Flow Potential Areas." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44 (2), 166-179. (in Chinese))
- [8] 陳振宇、藤田正治、堤大三 (2014)，「基岩位置及土層特性對降雨逕流與大規模崩塌之影響」，中華水土保持學報，45(4)，243-256。(Chen, C.Y., Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2014). "The Influence of Bedrock Location and Soil Characteristics on Rainfall-Runoff and Large-Scale Landslides." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 45 (4), 243-256. (in Chinese))
- [9] Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., and Reichenbach, P. (1991). "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard." *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5), 427-445.
- [10] Casadei, M., Dietrich, W.E., and Miller, N.L. (2003). "Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes." *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9), 925-950.
- [11] Chang, K.T., and Chiang, S.H. (2009). "An integrated model for predicting rainfall-induced landslides." *Geomorphology*, 105(3-4), 366-373.
- [12] Crosta, G.B., Chen, H., and Frattini, P. (2006). "Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches." *Engineering Geology*, 83(1-3), 236-253.
- [13] Dahal, R.K. (2012). "Rainfall-induced landslides in Nepal." *International Journal of Erosion Control Engineering*, 5(1), 1-8.

- [14] Fujita, M., and Tsutsumi, D. (2008). "Several important issues from field and model investigations on landslides." *Proceedings of hydraulic engineering*, 52, 9-12.
- [15] Kosugi, K.I. (1996). "Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties." *Water Resource Research*, 32(9), 2697-2703.
- [16] Kubota, T., and Nakamura, H. (1991). "Landslide susceptibility estimation by critical slip surface analysis combined with reliable analysis." *Journal of Japan Landslide Society*, 27(4), 18-25.
- [17] Lee, K.T., and Ho, J.Y. (2009). "Prediction of landslide occurrence based on slope-instability analysis and hydrological model simulation." *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 489-497.
- [18] 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." *Landslides*, 7(3), 325-338.
- [19] Takasao, T., and Shiiba, M. (1988). "Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping." *Journal of Hydrology*, 102(1-4), 301-322.)
- [20] Wang, C., Esaki, T., Xie, M., and Qiu, C. (2006). "Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata-Hougawachi area, Japan." *Environ Geol*, 51(1), 91-102.
- [21] Wieczorek, G.F., and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M, Hunger O (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Praxis, Springer Berlin Heidelberg, 325-362.
- [22] Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004). "GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model." *Natural Hazards*, 33(2), 265-282.

2014年08月06日 收稿

2014年09月16日 修正

2014年09月22日 接受

(本文開放討論至2015年9月30日)