

## 結合系集降雨預報之淺層崩塌預警模式

### Landslide Warning System Integrated with Ensemble Rainfall Forecasts

財團法人國家實驗研究院  
台灣颱風洪水研究中心  
副研究員

**何 瑞 益**

**Jui-Yi Ho**

財團法人國家實驗研究院  
台灣颱風洪水研究中心  
佐理研究員

**黃 琇 蔓**

**Xiu-Man Huang**

國立海洋大學  
河海工程學系特聘教授  
財團法人國家實驗研究院  
台灣颱風洪水研究中心  
兼任資深顧問

**李 光 敦**<sup>\*</sup>

**Kwan Tun Lee**

國立臺灣大學  
大氣科學系教授  
財團法人國家實驗研究院  
台灣颱風洪水研究中心  
主任

**李 清 勝**

**Cheng-Shang Lee**

#### 摘 要

臺灣山區地形陡峭與地質脆弱，再加上颱風來臨時所帶來的豐沛雨量，往往造成崩塌等坡地災害的發生。欲有效降低颱風與豪雨所帶來的坡地災害損失，除必要的工程方法外，亦須配合適當的災害預警和應變措施，在災前掌握颱風與豪雨動態，因此準確的定量降雨預報技術和崩塌模擬能力，是坡地崩塌預警減災的重要環節。

本研究採用系集定量降雨預報技術，彌補單一模式預報的不確定性，以提供未來的降雨預報。此外，研究中採用無限邊坡穩定分析理論與地形指數模式為基礎，建置物理型淺層崩塌預警模式。此模式不僅可考量集水區地文特性，並能分析降雨強度對於飽和水位之變化，進而計算集水區中邊坡安全係數，藉此判斷淺層崩塌災害可能發生的時間。

本研究選用台 9 甲線 10.2K 上邊坡集水區為示範集水區，以及 10 場颱風事件資

\*通訊作者，國立臺灣海洋大學河海工程學系教授，20224 基隆市中正區北寧路 2 號，E-mail: ktlee@ntou.edu.tw

料，逐時進行 6 小時之崩塌預警。研究中並採用可偵測率、誤報率、預兆得分以及正確率，以此評估結合系集降雨預報之坡面崩塌警戒模式之優劣程度。研究結果顯示，模式對於淺層崩塌發生時間偵測率為 0.73 以上；誤報率低於 0.33；預兆得分 0.53 以上。冀於往後坡地災害產生前，能提供相關單位作為災害應變之參考依據，以保障民眾生命財產的安全。

**關鍵詞：**系集定量降雨預報、崩塌預警模式、飽和水位變化。

## ABSTRACT

Taiwan is prone to hillslope disasters in the mountain area because of its special topographical, geological, and hydrological conditions. During typhoons and rainstorms, severe shallow landslides frequently occur. To mitigate the impact of shallow landslides, not only the structural measures are necessary, but also adequate warning systems and contingency measures must be executed. Hence, precise precipitation forecasts and landslide prediction are the most important measures in practice.

To account for inherent weather uncertainties precipitation forecasts based on ensemble model predictions was adopted in this project instead of using a single model output. A shallow landslide prediction model based on infinite-slope model and TOPMODEL was developed. In considering detail topographic characteristics of the subcatchment, the proposed model can estimate the change of saturated water level during rainstorms, and then link with the slope instability analysis to clarify whether shallow landslides can occur in the subcatchment.

The subcatchment on No. 9A Highway at 10.2 K was selected as the test sites for landslide predictions with a lead time of 6 hours. Hydrological data and landslide observed records from 10 typhoons events were used to verify the applicability of the model. Four indexes including the probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR), and threat score (TS) were adopted to assess the performance of the model. The results indicated that the POD for the landslide prediction by using the proposed model was higher than 0.73, the FAR was lower than 0.33, and the TS was higher than 0.53. It is promising to apply the proposed model for landslide early warnings to reduce the loss of life and property.

**Keywords:** ensemble rainfall forecasts, landslide warning system, changes in saturated water levels.

## 一、前言

臺灣位處於西北太平洋颱風發展的主要路徑上，據中央氣象局統計臺灣近百年平均每年遭受 3~4 個颱風侵襲。且因臺灣山區地形陡峭與地質脆弱，再加上颱風來臨時所帶來的豐沛雨量，

往往造成崩塌及土石流的發生，如 2015 年 8 月蘇迪勒颱風造成新店、烏來山區發生 7 處崩塌與土石流的災情，亦造成連外道路中斷，形成孤島危機。因此如何應用山區之降雨預報資訊建立準確的山區坡地災害警戒模式，並適時提出警訊，減少財產損失及人員傷亡，乃為現今相當重要之

課題。

欲有效降低颱風與豪雨所帶來的坡地災害損失，除必要的工程方法外，亦須配合適當的災害預警和應變措施，在災前掌握颱風與豪雨動態，因此準確的定量降雨預報技術和災害模擬能力，是坡地崩塌預警減災的重要環節。近年有關颱風降雨預報技術之研究中，依其理論基礎可大致概分為物理型預報模式與統計型預報模式兩大類型。物理型預報模式乃基於大氣動力理論之前提下，配合數值計算方法，建置颱風降雨預報模式。因此，使用物理型預報模式可在較完整之物理架構考量下，進行颱風降雨的模擬與預報。國內學研界曾使用由美國賓州州立大學(Pennsylvania State University, PSU)與美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)共同發展之第五代中尺度大氣動力區域數值模式(Fifth-Generation Mesoscale Meteorological Model, MM5)，以及同為 NCAR 所發展的新一代中尺度數值天氣預報模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)模擬侵台颱風，進行物理參數的系集模擬實驗，結果顯示選擇適合的物理參數法可模擬出較佳的颱風路徑及降雨分佈。由於數值天氣模式預報有其極限，加以大氣的隨機特性，單一模式預報皆有其一定程度之不確定性，無法完全正確預報實際的天氣狀況。因此，需透過系統性的分析與研究，選取最佳化之模式組合，發展系集預報技術，以降低大氣預報之不確定性。就全球模式或區域模式，莫不極力發展系集預報系統，如歐洲氣象中心(ECMWF)作業中心每日產生 51 個成員，15 天預報的全球系集預報產品，該系集產品對於颱風路徑預報所提供之客觀的預報不確定性，在中央氣象局預報中心實際預報作業上扮演重要的角色。美國國家環境預報中心(NCEP)提供每日 88 個系集成員與 16 天的預報結果。在亞洲地區，日本氣象廳(JMA)的 Medium-Range Ensemble Prediction Model 採用的預報樣本 51 組，利用全球模式預報進行系集預報，垂直方向為 40 層。韓國氣象局(KMA)則利用全球模式預報進行系集預報，垂直方向為 40 層，預報樣本 32 組。

(李與洪，2011)。

而針對坡地災害預警的部分，傳統方式多採用歷史觀測雨量資料配合崩塌災害發生事件紀錄，以統計方法計算致災雨量門檻值，藉此進行崩塌預警之工作。如 Caine (1980)與 Hong *et al.* (2006)蒐集世界各地曾發生坡地之降雨強度與降雨延時資料，藉由這些紀錄資料點的下限，以統計迴歸方式決定坡地災害發生之臨界關係。

Cannon and Ellen (1985)與 Wieczorek (1987)利用相同的方法，調查美國加州舊金山灣地區多場崩塌資料與加州 La Honda 鎮之單場崩塌資料，分析坡地災害與降雨之關係。Keefe *et al.* (1987)利用 Caine (1980), Cannon and Ellen (1985)及 Wieczorek (1987)所收集之資料，以平均降雨強度及降雨延時之關係，建立坡地災害發生之臨界降雨條件。Lee *et al.* (2009)利用多變量統計法進行特定區域之山崩潛勢分析，並以 2001 年桃芝颱風事件作為模式訓練案例，而後選用 2004 年敏督利颱風為模式測試。由分析結果可知，最大降雨強度為模式中主控因子，並應用於台灣中部得到良好之山崩預測結果。然而不同地區之堆積物特性、集水區坡度、地質、地貌以及氣候條件，所能激發坡地災害所需之降雨條件應有所不同，因此統計分析之崩塌預警仍有其極限。

而集水區邊坡穩定之物理方法常採用無限邊坡理論(Skempton and Delory, 1957)，其方法乃由土體之阻滯力  $\tau_r$  (resistance force)及驅動力  $\tau_d$  (driving force)之比值，計算土體之安全係數  $FS$  (factor of safety,  $FS = \tau_r/\tau_d$ )，以此安全係數  $FS$  評估是否會發生崩塌。如 Iverson (2000)利用 Richards 方程式之簡單解析解，計算不考慮超滲降雨作用下，其斜坡下之飽和與未飽和入滲，並利用無限邊坡穩定分析，模擬飽和水位上升造成邊坡破壞情形。Casadei *et al.* (2003)運用無限邊坡理論結合水文模式，配合 1950 至 1998 年之日雨量，模擬驗證加州 San Mateo County 集水區之淺層崩塌災害發生時間與位置。近年來隨著地理資訊系統的發展，可根據高解析度之集水區地文、水文、以及土地使用等空間資訊，配合邊坡穩定理論與地形性水文模式，以進行崩塌災害模擬

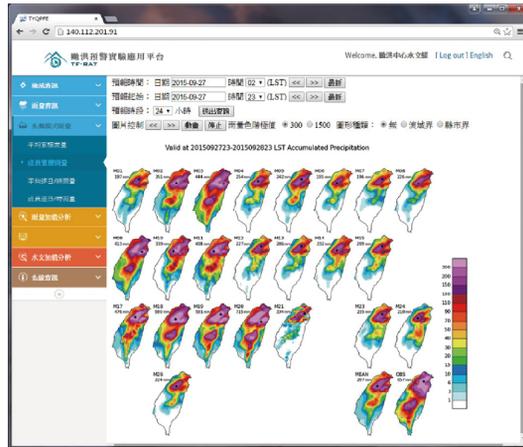


圖 1 臺灣定量降雨系集預報實驗(TAPEX)展示平台。

(Lee and Ho, 2009; Ho and Lee, 2017)。

本研究採用系集定量降雨預報技術，以彌補單一模式預報的不足，藉由多個不同的系集成員預報，期望系統能包含模式預報的不確定性，並且能將其不確定性量化，以提供未來的降雨預報。此外，採用地形性水文模式配合數值高程模式，以考量集水區水流匯集之情況，進而建置集水區坡面崩塌預警分析模式，藉此反應降雨情形與集水區地形與水流之匯集狀況，並分析飽和水位與坡面穩定安全係數變化情況，以計算可能產生坡面崩塌之位置與時間。冀於往後坡地災害產生前，能迅速地完成分析工作，以掌握可能致災之時間與範圍，並提供相關單位作為災害應變之參考依據，以保障民眾生命財產的安全。

## 二、研究方法

本研究應用 Ho and Lee (2017)所發展的 SIMTOP 模式(Shallow landslide prediction based on Infinite slope Model and TOPMODEL)進行淺層崩塌模擬，分別建構地形性水文模式與邊坡穩定分析模式，以模擬降雨期間集水區表層土壤飽和水位與坡面安全係數的變化，藉此預測集水區中發生坡面崩塌之時間與位置。同時，為增加災害應變之所需時間，故應用 SIMTOP 模式結合系集定量降雨預報實驗(TAPEX)，以建構完整之集

水區淺層崩塌即時預警模式。此外，研究中採用三種評估指標，以此分析此集水區淺層崩塌即時預警模式之優劣程度，茲將相關研究方法說明如下。

### 2.1 系集定量降雨預報實驗(TAPEX)

由於氣象預報本身有其區域性特徵與不確定性，且無法直接移植國外之研究成果，需透過大量之分析研究，歸納最適用於臺灣地區複雜地形之模式設定。如圖 1 所示，台灣颱風洪水研究中心於 99 年起進行「臺灣定量降雨系集預報實驗(Taiwan Cooperative Precipitation Ensemble Forecast Experiment, TAPEX)」，其目的在研發測試定量降雨預報技術並增加災防單位應變作業時可參考之資訊，協助提升災害防救效能。此實驗結合學研界(臺灣大學、中央大學、臺灣師範大學及文化大學)與作業單位(中央氣象局)之研發能量，並結合國家高速網路與計算中心的計算資源及國家災害防救科技中心的實務經驗。於颱風影響臺灣期間，每日產出 4 次即時高解析度臺灣地區天氣狀況並利用系集統計方法與機率預報概念，分析颱風路徑與雨量分布，並提供致災性雨量的機率預報。104 年實驗成員新增至 27 個系集成員，其模式包含 21 組 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)、2 組第五代中尺

度氣象模式(The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model, MM5), 2 組雲解析風暴模式(Cloud-Resolving Storm Simulator, CReSS)以及 2 組 HWRF 模式(Hurricane Weather Research and Forecasting Model)。本研究採用系集定量降雨預報實驗之分析結果, 結合各雨量站即時回傳資料, 進行每小時滾動式更新, 以作為集水區淺層崩塌即時預警模式之輸入。

## 2.2 SIMTOP 模式

SIMTOP 模式乃採用無限邊坡穩定分析(Skempton and Delory, 1957)作為坡面穩定分析之基礎。因降雨入滲所造成崩塌的深度, 通常遠小於坡地的長度與寬度, 故可利用無限邊坡穩定分析, 探討邊坡之穩定性。無限邊坡穩定分析乃由土體之阻滯力  $\tau_r$  (resistance force)以及土體下滑驅動力  $\tau_d$  (driving force)之比值, 即為土體之安全係數  $FS$  (factor of safety)表示土體之穩定與否; 其判斷式可表示如下

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_d} \quad (1)$$

$$= \frac{C + \rho_s g D \cos^2 \beta \tan \phi - \rho_w g h_w(t) \cos^2 \beta \tan \phi}{\rho_s g D \sin \beta \cos \beta}$$

式中  $C$  為有效凝聚力[N/m<sup>2</sup>];  $\rho_s$  為飽和土壤密度[kg/m<sup>3</sup>];  $\rho_w$  為水體密度[kg/m<sup>3</sup>];  $\beta$  為地表面之傾斜坡角;  $\phi$  為內摩擦角;  $g$  為重力加速度(= 9.81 m/s<sup>2</sup>),  $D$  為土壤厚度[m];  $h_w(t)$  為  $t$  時刻之飽和水位高度[m]。當土體安全係數之  $FS = 1$  時, 即土體之驅動力等於阻滯力, 此時邊坡土體將處於臨界狀態。當土體安全係數之  $FS < 1$  時, 即土體之驅動力大於阻滯力, 此時邊坡土體將會產生滑動或破壞之不穩定情形。反之, 當  $FS > 1$  時, 即土體之下滑驅動力小於阻滯力, 此時邊坡土體會呈穩定情形。上式目前已被廣泛地使用在邊坡穩定性之評估(Montgomery and Dietrich, 1994; Wu and Sidle, 1995; Casadei *et al.*, 2003; Apip *et al.*, 2010; Zizioli *et al.*, 2013)。

由式(1)中可發現, 安全係數會隨著飽和水位之昇降而變動, 是以可利用地形性水文模式模擬

飽和水位高度( $h_w$ )隨時間變化之情形, 而達到集水區坡面穩定性之分析。本研究選用地形指數模式(TOPMODEL; Beven and Kirkby, 1979)進行集水區水文模擬, 此模式乃是一個以地形特性為基礎的半分布水文模式(semi-distributed model)。當累積雨量超過入滲容量時, 使得飽和含水層之水位逐漸上升, 因此可以藉由集水區地形與土壤條件, 推求地表與飽和含水層之間的距離。地形指數模式劃分逕流貯蓄機制為根系層(root zone)、未飽和含水層(unsaturated zone)與飽和含水層(saturated zone); 並定義地表與飽和含水層間之距離為飽和深度  $z_j$ 。因此距滑動面以上之飽和深度  $h_{wj}$  可表示為

$$h_{wj}(t) = D_j - z_j(t)$$

$$= D_j - \bar{z}(t) - m \left[ \lambda - \ln \left( \frac{a}{\tan \beta} \right)_j \right] \dots \dots \dots (2)$$

式中  $h_{wj}(t)$  為  $t$  時刻之  $j$  格點飽和深度;  $D_j$  為  $j$  格點之土壤厚度;  $\bar{z}(t)$  為  $t$  時刻飽和深度之平均值;  $m$  為模式係數, 可藉由流量退水紀錄求得;  $a$  與  $\tan \beta$  為流經  $j$  位置點之單位寬度集流面積與地表坡度;  $\ln(a/\tan \beta)$  為  $j$  位置點的地形指數(topographic index, Kirkby, 1975),  $\lambda$  為集水區所有位置點地形指數值之平均。而  $t$  時刻飽和含水層的平均深度可計算如下

$$\bar{z}(t+1) = \bar{z}(t) + Q_b(t) \cdot \Delta t - Q_v(t) \cdot \Delta t \dots \dots \dots (3)$$

式中  $\bar{z}(t)$  為  $t$  時刻飽和深度之平均值;  $Q_b(t)$  為  $t$  時刻集水區出口處之飽和含水層出流量;  $Q_v(t)$  為  $t$  時刻飽和含水層平均補注量。

由於傳統無限邊坡分析理論乃採用網格計算方式, 並以安全係數判斷穩定格點與不穩定格點。然而, 實際情況中格點與格點間具有相互影響之效應, 如該網格判定為不穩定格點時, 可能因鄰近穩定網格影響, 使致該格點無法崩落, 形成穩定的情況。為減少格點間相互之影響, 本研究乃以集水區平均安全係數評估集水區淺層崩塌發生與否, 並藉由(2)式將(1)式重新表示為:

$$\overline{FS}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{C_j}{\rho_s g D_j \sin \beta_j \cos \beta_j} + \frac{\tan \phi_j}{\tan \beta_j} + \frac{\left[ D_j - \bar{z}(t) - m \left( \lambda - \ln \left( \frac{a}{\tan \beta} \right) \right) \right] \rho_w \tan \phi_j}{\rho_s D_j \sin \beta_j \cos \beta_j} \right) \dots\dots\dots(4)$$

式中  $\overline{FS}(t)$  為  $t$  時刻之集水區平均安全係數； $N$  為集水區格點數。當集水區平均安全係數  $\overline{FS}(t) < 1$  時，即  $t$  時刻之整體土壤驅動力大於阻滯力，此時集水區中將會產生淺層崩塌之不穩定情形。反之，當  $\overline{FS}(t) > 1$  時，即  $t$  時刻之整體土壤下滑驅動力小於阻滯力，此時邊坡土體會呈穩定情形。

### 2.3 整合 TAPEX 與 SIMTOP 模式

本研究應用颱風中心 TAPEX 中由物理型數值天氣模式產出之 20 組雨量預估資訊，結合地面實體雨量測站之即時觀測雨量資料，逐時滾動更新集水區中之未來 6 小時雨量預估資訊，並配合 SIMTOP 模式即時演算，產出示範區域未來 1~6 小時的集水區平均安全係數。並計算各組系集成員未來 1~6 小時的集水區平均安全係數，可表示為

$$\left\{ m_1 \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] \quad m_2 \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] \dots m_i \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] \right\} \dots\dots\dots(5)$$

式中  $m_i$  為編號第  $i$  組的系集成員(member)。研究中為避免系集成員過度高估與低估的情況發生，採用四分位排序之分析方法，去除整體之前後各 25% 之系集成員，留下排序為 25~75% 之系集成員。同時，研究中應用單位步階函數(unit step function)，以此判斷各系集成員之預報雨量是否會產生淺層崩塌，如下所示

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{if } m_i \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] < 1 \quad \text{Unstable} \\ 0 & \text{if } m_i \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] \geq 1 \quad \text{Stable} \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

當未來 6 小時系集成員之土體安全係數小於 1 時 ( $m_i \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] < 1$ )，則單位步階函數設定為 1 ( $I_i = 1$ )，表示此系集成員之未來 6 小時預報雨量將造成坡面之驅動力大於阻滯力，此時集水區中

將會產生淺層崩塌之不穩定情形。反之，當未來 6 小時之系集成員所分析集水區平均安全係數大於或等於 1 時 ( $m_i \left[ \overline{FS}_{t=1-6h} \right] \geq 1$ )，則單位步階函數設定為 0 ( $I_i = 0$ )，即此系集成員  $m_i$  之未來 6 小時預報雨量將造成土體之下滑驅動力小於阻滯力，此時邊坡土體會呈穩定情形。又配合機率預報之概念，彙整各系集成員之結果，計算淺層崩塌發生機率，如下所示

$$P_{t=1-6h} = \frac{1}{n} [I_{1,t=1-6h} + I_{2,t=1-6h} + \dots + I_{n,t=1-6h}] \quad (7)$$

式中  $P_{t=1-6h}$  為未來 6 小時中可能發生淺層崩塌的機率，其機率值介於 0 到 1。本研究假設以淺層崩塌機率為 0.5 作為門檻值(代表有一半以上的系集成員判定危險)，表示當機率大於或等於 0.5 ( $P_{t=1-6h} > 0.5$ ) 時，將判斷會發生淺層崩塌；反之，小於 0.5 時，模式判斷為穩定狀態。

### 2.4 評估指標

為評估模式對於淺層崩塌之優劣程度，可將模式預報結果與實際觀測資料比對，利用誤差矩陣判斷各模式之準確率，誤差矩陣可分為四種情形，分別為有崩塌/有預測(hits)、有崩塌/無預測(misses)、無崩塌/有預測(false alarms)、無崩塌/無預測(no events)(如表 1 所示)。故可利用其分類結果，計算可偵測率(Probability of Detection, POD)、誤報率(False Alarm Ratio, FAR)以及預兆

表 1 誤差矩陣

| 模擬 \ 紀錄 | 崩塌                        | 未崩塌                    |
|---------|---------------------------|------------------------|
| 崩塌      | 有崩塌/有預測<br>(hits)         | 有崩塌/無預測<br>(misses)    |
| 未崩塌     | 無崩塌/有預測<br>(false alarms) | 無崩塌/無預測<br>(no events) |

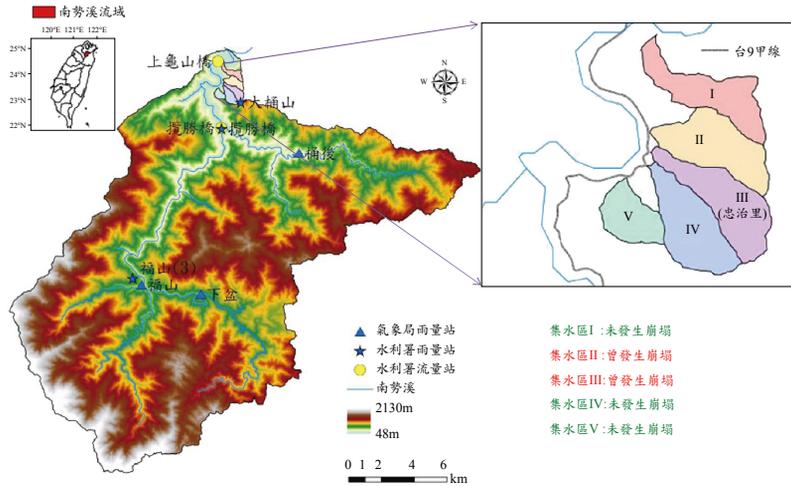


圖 2 研究示範區域位置圖。

得分(Threat Score, TS)等三種評估指標，以確認 SIMTOP 模式之適用性。其計算方式可表示如下 (Wilks, 2005; Schaefer, 1990)

$$POD = \frac{\text{hits}}{\text{hits} + \text{misses}} \dots\dots\dots(8)$$

$$FAR = \frac{\text{false alarms}}{\text{hits} + \text{false alarms}} \dots\dots\dots(9)$$

$$TS = \frac{\text{hits}}{\text{hits} + \text{false alarms} + \text{misses}} \dots\dots\dots(10)$$

如(8)式所示，可偵測率(POD)表示有多少比例的淺層崩塌事件被正確地預測，可偵測率(POD)之範圍值為 0 到 1，當可偵測率(POD)之值愈接近 1，表示模式預測效能愈佳。然而，可偵測率僅考慮命中事件(hits)而忽略假警報事件，對於發生次數較少的個案，其偵測率將會偏高。因此通常同時考慮誤報率(FAR)，如(9)式中誤報率(FAR)為描述分析事件中有多少比例的事件是錯誤的假警報(false alarms)，當誤報率(FAR)之值愈接近 0，表示模式預測效能愈佳。此外，也可採用預兆得分(TS)進行模式評估，(10)式中預兆得分(TS)同時考慮假警報(false alarms)和失誤(misses)的事件，可視為描述模式預報的正確率，而預兆得分(TS)之範圍值為 0 到 1，當預兆得分(TS)之值愈接近 1，

表示模式預測效能愈佳；無預報能力時，預兆得分(TS)為 0。

### 三、模式應用與分析

本研究首先分析省道台 9 甲線烏來段於 2010 年至 2016 年 9 月 30 日所發生之淺層崩塌災害，以進行長期評估模擬，藉此檢視 SIMTOP 模式對於淺層崩塌之預測能力，另外選用崩塌降雨強度-延時臨界曲線，以及台灣公路總局重點監控路段雨量門檻值等 3 種方式，進行後續評估分析。而後整合系集定量降雨預報之結果，進行淺層崩塌預警模式分析與驗證。

#### 3.1 研究區域概述

2015 年中颶蘇迪勒挾帶豪雨重創新北市烏來區，造成忠治里地區台 9 甲 9.8K、10.2K 處發生嚴重的淺層崩塌與土石流災害，致使山區交通中斷，造成烏來地區形成孤島，嚴重威脅當地居民生命財產。故本研究選擇烏來忠治里地區為示範集水區，其地理位置位於南勢溪流域，其地理位置如圖 2 所示。南勢溪流域的平均高程約為 870 公尺，最高高程為 2,210 公尺，平均坡度約 0.562；全區域地質屬於第三季亞變質岩區，地質包含大桶山層(岩性為硬頁岩夾泥質砂岩)、乾溝層(岩性

表 2 研究集水區之地文因子

| 位置 | 集水區 | 集水面積 $A$ (km <sup>2</sup> ) | 渠流長度 $L_c$ (km) | 平均坡度 $S$ (m/m) | 渠流坡度 $S_c$ (m/m) |
|----|-----|-----------------------------|-----------------|----------------|------------------|
| 烏來 | I   | 0.53                        | 1.39            | 0.495          | 0.229            |
|    | II  | 0.58                        | 0.32            | 0.579          | 0.256            |
|    | III | 0.59                        | 1.17            | 0.724          | 0.322            |
|    | IV  | 0.62                        | 0.80            | 0.589          | 0.313            |
|    | V   | 0.37                        | 0.10            | 0.467          | 0.271            |

表 3 上龜山橋集水區之降雨逕流模擬分析事件

| 研究集水區 | 暴雨事件       | 尖峰雨量 (mm/hr) | 累積雨量 (mm) | 降雨延時 (hr) | 洪峰流量 (m <sup>3</sup> /s) | 檢定/驗證 |
|-------|------------|--------------|-----------|-----------|--------------------------|-------|
| 上龜山橋  | 1996/07/30 | 43.94        | 603.99    | 51        | 2320                     | 檢定    |
|       | 1997/08/28 | 37.64        | 481.94    | 42        | 1550                     | 驗證    |
|       | 1998/10/04 | 25.88        | 399.01    | 81        | 708                      | 驗證    |
|       | 2000/08/22 | 25.47        | 315.44    | 41        | 788                      | 驗證    |

為硬頁岩夾薄至厚層砂岩)、紅土台地堆積(岩性為紅土、礫石、砂及粘土)、澳底層枋腳段、西村層與巴陵層等。研究中為能充分瞭解所建立的地形性水文模式的適用性與模式參數，以南勢溪下游之上龜山橋集水區為模式應用集水區。配合觀測雨量與流量資料，進行模式參數檢定與驗證工作。此外，本研究根據行政院農業委員會水土保持局之重大土砂災情報告與交通部公路總局公路防救災資訊系統之歷史災害資料，故選取新北市烏來區台 9 甲線 5 處易致災位置點之上邊坡集水區進行分析(如圖 2 所示)。如表 2 所示，由數值高程模式分析可得台 9 甲線集水區 I 面積為 0.53 平方公里，集水區平均坡度為 0.495；而集水區 II (台 9 甲線 9.8K)面積為 0.58 平方公里，集水區平均坡度為 0.579；而集水區 III (台 9 甲線 10.2K) 面積為 0.59 平方公里，集水區平均坡度為 0.724；而集水區 IV 面積為 0.62 平方公里，集水區平均坡度為 0.589；而集水區 V 面積為 0.37 平方公里，集水區平均坡度為 0.467。2010 年至 2016 年期間，此區域經歷多場颱風豪雨事件，共有 3 次嚴重的淺層崩塌災害事件，分別為蘇迪勒

颱風(2015 年)、杜鵑颱風(2015 年)以及梅姬颱風(2016 年)。

### 3.2 SIMTOP 模式長期分析

研究中首先為瞭解地形指數模式於颱風期間之逕流模擬情況，選用 1996/07/30、1997/08/28、1998/10/04、2000/08/22 等四場暴雨場次，如表 3 所示，進行小時流量之降雨逕流模擬分析。對於上龜山橋流量站之逕流模擬結果，為評估地形指數模式於逕流模擬結果之優劣程度，因此利用洪峰流量誤差( $EQ_p$ )、洪峰流量到達時刻誤差( $ET_p$ )、效率係數( $CE$ )以及相關係數( $CC$ )等四種評鑑指標，以驗證地形指數模式於降雨逕流模擬結果之適用性，其分析結果詳如表 4。由表中可知最大洪峰流量誤差為 15.9%；最大洪峰流量到達時刻誤差為 1 小時；而由效率係數與相關係數可知，紀錄與模擬的流量歷線具有高度相關性，顯示地形指數模式具有良好的逕流模擬結果。由分析結果得知，研究集水區之退水參數  $m$  為 0.06m，地表飽和土壤之水力傳導度  $K_0$  為  $5 \times 10^{-3}$  m/s，而根系層最大貯蓄量  $S_{RZmax}$  為 0.02 m。

表 4 上龜山橋集水區逕流模擬結果

| 研究集水區 | 暴雨事件       | 洪峰流量誤差<br>$EQp$ (%) | 洪峰流量到達時刻<br>誤差<br>$ETp$ (hr) | 效率係數<br>$CE$ | 相關係數<br>$CC$ |
|-------|------------|---------------------|------------------------------|--------------|--------------|
| 上龜山橋  | 1996/07/30 | 15.9                | 1                            | 0.883        | 0.978        |
|       | 1997/08/28 | 6.1                 | -1                           | 0.918        | 0.967        |
|       | 1998/10/04 | 10.4                | 0                            | 0.858        | 0.967        |
|       | 2000/08/22 | 1.1                 | -1                           | 0.805        | 0.965        |

表 5 交通部公路總局重點監控路段雨量警戒標準 (2016 年第 7 版)

| 位置              | 等級   | 雨量門檻值  |
|-----------------|------|--|
| 臺 9 甲線<br>(烏來段) | 黃色預警 | $R_1 \geq 25$ mm or $R_{24} \geq 200$ mm   |
|                 | 橙色警戒 | $R_1 \geq 35$ mm or $R_{24} \geq 250$ mm   |
|                 | 紅色行動 | (a) $R_1 \geq 50$ mm<br>(b) $R_1 \geq 45$ mm and $R_{24} \geq 350$ mm<br>(c) $R_1 \geq 40$ mm and $R_{24} \geq 380$ mm |

註： $R_1$  為前 1 小時累積雨量； $R_{24}$  為前 24 小時累積雨量

無限邊坡穩定分析所需土體參數，可經由現地土壤採樣資料進行土壤顆粒比重與三軸壓縮實驗、衛星影像辨釋(計算植生覆蓋指數)、以及現地觀察邊坡處於臨界之崩塌型態。故採用土壤總體密度 2000 kg/m<sup>3</sup>、內摩擦角 30 度、以及有效凝聚力 2.0 kPa 進行後續分析，上述土體參數均滿足物理意義與前人研究之土體參數範圍，研究中以此單一組模式參數進行 2010 年至 2016 年之模擬。

本研究之 SIMTOP 模式乃是結合無限邊坡穩定分析理論與地形水文模式分析結果，因此需要集水區詳細地文資料以進行模式演算。研究中採用內政部地政司 5m × 5m 數值高程資料，並採用 Lee (1998) 之方式建立數值高程模式，以推求水文模式中所需之地文因子(如表 2 所列)。研究中除了檢視 SIMTOP 模式對於淺層崩塌之預測能力，另外選用崩塌降雨強度-延時臨界曲線，以及台灣公路總局重點監控路段雨量門檻值(如表 5)等 3 種方式，分析台 9 甲線烏來路段於 2010 年至 2016 年所發生之淺層崩塌災害，以進行長期評估模擬。

欲檢視本研究發展的淺層崩塌模式之預測能力，故研究區域於 2010 年 1 月 1 日至 2016

年 9 月 30 日所發生之淺層崩塌災害，以進行長期評估模擬。如圖 3 所示，上方藍線為時雨量紀錄資料，下方五條曲線分別代表集水區 I、集水區 II (台 9 甲 9.8K)、集水區 III (台 9 甲 10.2K)、集水區 IV 以及集水區 V 之集水區空間平均安全係數( $\overline{FS}$ )之變化曲線。其中平均安全係數會隨降雨強度大小而產生變化，其原因乃由於降雨量增加，導致更多的水份入滲於土壤中，當累積雨量超過入滲容量時，造成飽和含水層之水位逐漸抬升，即距滑動面以上之飽和水位升高，產生淺層崩塌之可能性亦隨之增加。研究集水區中編號 I 號、IV 號與 V 號集水區之平均安全係數在 2010 年 1 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日期間皆大於 1，表示該三個集水區處於穩定狀態；而在 2015 年蘇迪勒與杜鵑颱風期間，II 號集水區平均安全係數卻有小於 1 之時段；而在 2012 年蘇拉颱風、2015 年蘇迪勒與杜鵑颱風、2016 年梅姬颱風期間，III 號集水區平均安全係數卻有小於 1 之時段。表示 II 號(台 9 甲線 9.8K)與 III 號(台 9 甲線 10.2K)集水區曾於上述颱風期間處於不穩定狀態，上述兩處集水區均與紀錄發生淺層崩塌位置吻合，且與淺層崩塌發生事件大致相符，因此本

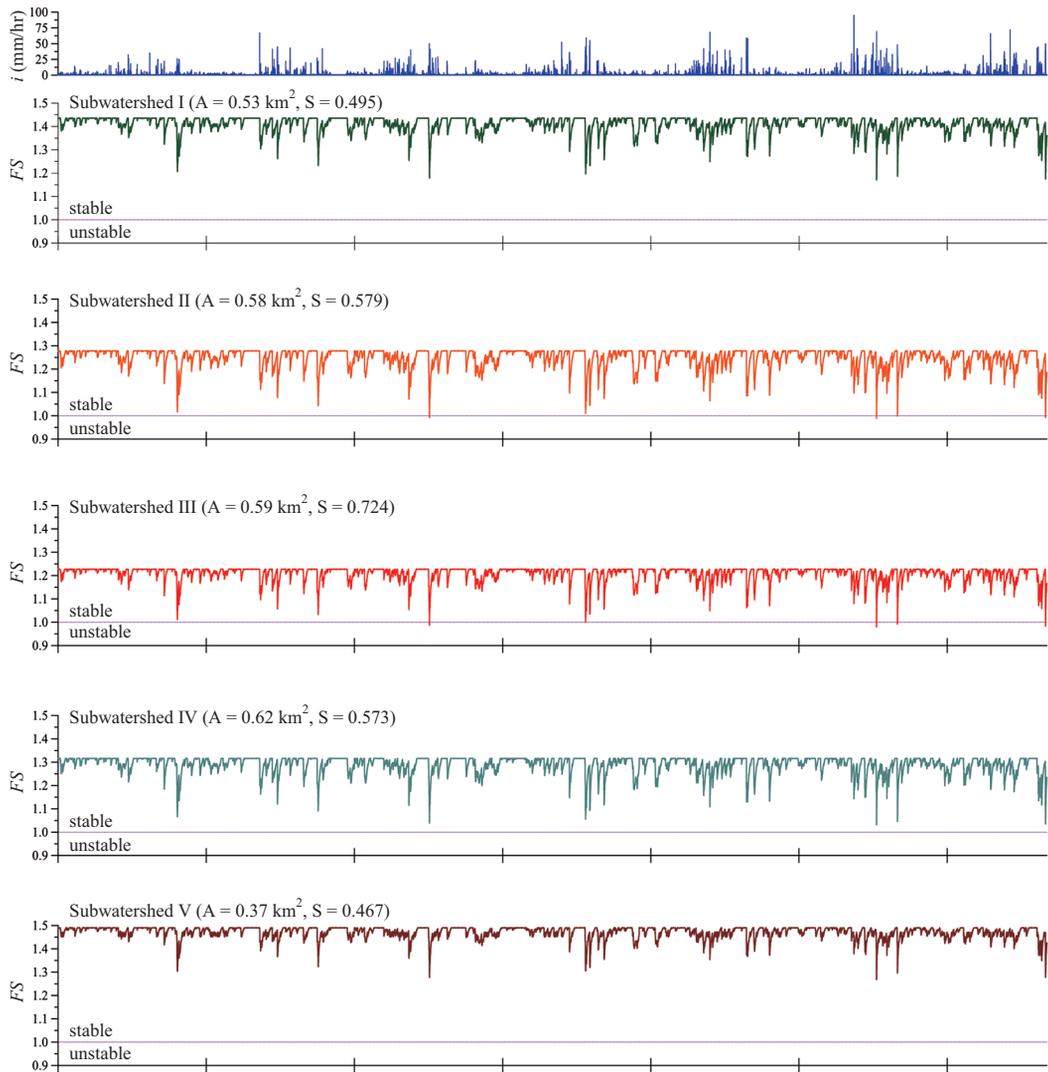


圖 3 安全係數分析結果。

模式在淺層崩塌區域上的預測與紀錄結果相符。

如表 6 所示，研究中除了檢視 SIMTOP 模式對於淺層崩塌之預測能力，另外選用崩塌降雨強度-延時臨界曲線，以及台灣公路總局重點監控路段雨量門檻值等 3 種方式。分析研究區域於 2010 年 1 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日所發生之淺層崩塌災害，以進行長期評估模擬。研究中以最為危險的編號 III 集水區(台 9 甲線 10.2K)為例，進行後續詳細評估討論。如表 7 所示，依 SIMTOP 模

式分析結果比對實際災害資料後，對於集水區 III 之山區淺層崩塌災害可偵測率(POD)為 1.00 (8 式)，誤報率(FAR)為 0.25 (9 式)，以及預兆得分(TS)為 0.75 (10 式)，其分析結果均優於 Hong *et al.* (2006)與 Caine (1980)之崩塌降雨強度-延時臨界曲線以及公路總局黃色預警、橙色警戒、紅色行動之分析結果。上述分析顯示，本研究所發展的 SIMTOP 模式，在預測集水區 III (台 9 甲 10.2K)發生之淺層崩塌災害時間上，能有良好的預測結果。

表 6 各颱風豪雨場次之淺層崩塌分析結果

| 降雨事件              | 最大累積雨量 (mm)          |             |              |              |              | 崩塌<br>Y/N    | 臨界雨量線    |          | 公路總局     |          | 本研究<br>FS < 1 |          |
|-------------------|----------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|---------------|----------|
|                   | 1-h                  | 3-h         | 6-h          | 12-h         | 24-h         |              | Hong     | Caine    | 黃        | 橘        |               | 紅        |
| 2010/02/11        | rainstorm            | 12.0        | 29.0         | 32.0         | 32.0         | 33.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2010/05/29        | rainstorm            | 20.0        | 45.0         | 50.0         | 55.0         | 64.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2010/06/22        | rainstorm            | 32.0        | 69.0         | 73.0         | 73.0         | 77.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2010/06/23        | rainstorm            | 26.0        | 42.0         | 43.0         | 43.0         | 97.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2010/06/28        | rainstorm            | 18.0        | 22.0         | 22.0         | 26.0         | 32.0         | v        |          |          |          |               |          |
| 2010/07/14        | rainstorm            | 17.0        | 20.0         | 20.0         | 20.0         | 20.0         | v        |          |          |          |               |          |
| 2010/08/14        | rainstorm            | 35.0        | 41.0         | 41.0         | 41.0         | 41.0         | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2010/08/30        | Typhoon Namtheun     | 15.0        | 37.0         | 43.0         | 46.0         | 64.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2010/09/03        | rainstorm            | 25.0        | 25.0         | 25.0         | 25.0         | 25.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2010/09/11        | rainstorm            | 18.0        | 20.0         | 20.0         | 20.0         | 21.0         | v        |          |          |          |               |          |
| 2010/09/19        | Typhoon Fanapi       | 22.0        | 42.0         | 68.0         | 104.0        | 138.0        | v        | v        |          |          |               |          |
| 2010/10/21        | Typhoon Megi         | 26.0        | 69.0         | 96.0         | 171.0        | 308.0        | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2010/10/25        | rainstorm            | 25.0        | 59.0         | 94.0         | 125.0        | 138.0        | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2010/11/25        | rainstorm            | 8.0         | 21.0         | 40.0         | 63.0         | 65.0         | v        |          |          |          |               |          |
| 2011/05/12        | rainstorm            | 67.0        | 123.0        | 125.0        | 129.0        | 139.0        | v        | v        | v        | v        | v             |          |
| 2011/05/14        | rainstorm            | 18.0        | 29.0         | 48.0         | 76.0         | 85.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/05/27        | Typhoon Songda       | 13.0        | 28.0         | 41.0         | 53.0         | 74.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/06/12        | rainstorm            | 41.0        | 85.0         | 102.0        | 102.0        | 102.0        | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2011/06/16        | rainstorm            | 25.0        | 31.0         | 31.0         | 31.0         | 44.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2011/06/25        | Typhoon Meari        | 45.0        | 65.0         | 149.0        | 190.0        | 213.0        | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2011/06/28        | rainstorm            | 16.0        | 30.0         | 31.0         | 31.0         | 34.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/07/15        | rainstorm            | 22.0        | 41.0         | 44.0         | 45.0         | 45.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/07/25        | rainstorm            | 22.0        | 22.0         | 22.0         | 22.0         | 22.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/07/26        | rainstorm            | 43.0        | 67.0         | 67.0         | 67.0         | 67.0         | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2011/08/28        | Typhoon Nanmadol     | 14.0        | 27.0         | 47.0         | 70.0         | 119.0        | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/09/02        | rainstorm            | 20.0        | 24.0         | 24.0         | 24.0         | 30.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/09/15        | rainstorm            | 19.0        | 19.0         | 20.0         | 20.0         | 20.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2011/10/01        | rainstorm            | 27.0        | 53.0         | 91.0         | 113.0        | 127.0        | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2011/10/03        | rainstorm            | 22.0        | 53.0         | 86.0         | 120.0        | 201.0        | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2011/10/13        | rainstorm            | 42.0        | 62.0         | 62.0         | 62.0         | 62.0         | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2012/02/24        | rainstorm            | 11.0        | 24.0         | 44.0         | 78.0         | 88.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/04/11        | rainstorm            | 22.0        | 39.0         | 57.0         | 57.0         | 57.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/04/11        | rainstorm            | 22.0        | 39.0         | 57.0         | 57.0         | 57.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/04/20        | rainstorm            | 22.0        | 24.0         | 27.0         | 39.0         | 39.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/04/26        | rainstorm            | 18.0        | 32.0         | 40.0         | 49.0         | 73.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/05/04        | rainstorm            | 11.0        | 27.0         | 35.0         | 41.0         | 42.0         | v        |          |          |          |               |          |
| 2012/05/09        | rainstorm            | 27.0        | 39.0         | 41.0         | 41.0         | 41.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2012/05/15        | rainstorm            | 20.0        | 38.0         | 45.0         | 45.0         | 45.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/05/17        | rainstorm            | 16.0        | 30.0         | 33.0         | 33.0         | 50.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/05/19        | rainstorm            | 25.0        | 38.0         | 40.0         | 40.0         | 44.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2012/05/30        | rainstorm            | 19.0        | 45.0         | 54.0         | 57.0         | 85.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/06/08        | rainstorm            | 16.0        | 28.0         | 28.0         | 28.0         | 28.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/06/12        | rainstorm            | 29.0        | 69.0         | 108.0        | 168.0        | 233.0        | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2012/06/16        | rainstorm            | 40.0        | 61.0         | 61.0         | 61.0         | 70.0         | v        | v        | v        | v        |               |          |
| 2012/06/26        | rainstorm            | 17.0        | 28.0         | 28.0         | 28.0         | 28.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| <b>2012/08/03</b> | <b>Typhoon Saola</b> | <b>41.0</b> | <b>118.0</b> | <b>183.0</b> | <b>270.0</b> | <b>367.0</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> |               | <b>v</b> |
| 2012/08/09        | rainstorm            | 27.0        | 44.0         | 47.0         | 47.0         | 47.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2012/08/11        | rainstorm            | 19.0        | 27.0         | 27.0         | 27.0         | 27.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/08/17        | rainstorm            | 27.0        | 34.0         | 35.0         | 35.0         | 35.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2012/08/22        | Typhoon Tembin       | 29.0        | 56.0         | 68.0         | 77.0         | 95.0         | v        | v        | v        |          |               |          |
| 2012/09/14        | rainstorm            | 22.0        | 50.0         | 58.0         | 63.0         | 65.0         | v        | v        |          |          |               |          |
| 2012/09/15        | rainstorm            | 15.0        | 30.0         | 42.0         | 51.0         | 113.0        | v        |          |          |          |               |          |
| 2012/11/22        | rainstorm            | 19.0        | 25.0         | 33.0         | 33.0         | 33.0         | v        | v        |          |          |               |          |

表 6 各颱風豪雨場次之淺層崩塌分析結果(續)

|            | 降雨事件              | 最大累積雨量 (mm) |       |       |       |       | 崩塌<br>Y/N | 臨界雨量線 |       | 公路總局 |   |   | 本研究<br>FS < 1 |
|------------|-------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|------|---|---|---------------|
|            |                   | 1-h         | 3-h   | 6-h   | 12-h  | 24-h  |           | Hong  | Caine | 黃    | 橘 | 紅 |               |
| 2012/11/23 | rainstorm         | 23.0        | 50.0  | 60.0  | 74.0  | 92.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2012/12/08 | rainstorm         | 8.0         | 22.0  | 39.0  | 60.0  | 88.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2013/03/28 | rainstorm         | 17.0        | 21.0  | 22.0  | 23.0  | 26.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2013/05/11 | rainstorm         | 10.0        | 28.0  | 41.0  | 52.0  | 58.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2013/05/12 | rainstorm         | 15.0        | 27.0  | 34.0  | 46.0  | 46.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2013/05/21 | rainstorm         | 12.0        | 27.0  | 29.0  | 35.0  | 56.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2013/06/04 | rainstorm         | 23.0        | 57.0  | 74.0  | 85.0  | 85.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2013/06/05 | rainstorm         | 16.0        | 18.0  | 18.0  | 19.0  | 63.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2013/06/23 | rainstorm         | 52.0        | 65.0  | 65.0  | 65.0  | 65.0  |           | v     | v     | v    | v | v |               |
| 2013/06/24 | rainstorm         | 25.0        | 28.0  | 32.0  | 32.0  | 92.0  |           | v     | v     | v    |   |   |               |
| 2013/07/07 | rainstorm         | 17.0        | 18.0  | 18.0  | 18.0  | 27.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2013/07/13 | Typhoon Souli     | 36.0        | 85.0  | 137.0 | 173.0 | 182.0 |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2013/07/15 | rainstorm         | 23.0        | 27.0  | 27.0  | 27.0  | 28.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2013/08/21 | Typhoon Trami     | 45.0        | 98.0  | 167.0 | 257.0 | 310.0 |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2013/08/23 | rainstorm         | 59.0        | 90.0  | 92.0  | 92.0  | 92.0  |           | v     | v     | v    | v | v |               |
| 2013/08/31 | rainstorm         | 55.0        | 103.0 | 185.0 | 212.0 | 293.0 |           | v     | v     | v    | v | v |               |
| 2013/09/18 | rainstorm         | 22.0        | 29.0  | 37.0  | 39.0  | 40.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2013/09/21 | Typhoon Usagi     | 23.0        | 39.0  | 51.0  | 73.0  | 113.0 |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2013/10/06 | Typhoon Fitow     | 19.0        | 41.0  | 75.0  | 144.0 | 191.0 |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2013/12/17 | rainstorm         | 7.0         | 18.0  | 32.0  | 57.0  | 91.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2014/02/09 | rainstorm         | 8.0         | 18.0  | 30.0  | 57.0  | 103.0 |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2014/03/13 | rainstorm         | 13.0        | 34.0  | 38.0  | 45.0  | 55.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/05/05 | rainstorm         | 10.0        | 28.0  | 39.0  | 47.0  | 78.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/05/15 | rainstorm         | 23.0        | 31.0  | 38.0  | 40.0  | 41.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/05/20 | rainstorm         | 16.0        | 28.0  | 30.0  | 35.0  | 38.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/05/21 | rainstorm         | 22.0        | 28.0  | 45.0  | 59.0  | 93.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/05/24 | rainstorm         | 13.0        | 26.0  | 40.0  | 40.0  | 40.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2014/05/25 | rainstorm         | 23.0        | 31.0  | 31.0  | 31.0  | 71.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/05/28 | rainstorm         | 18.0        | 28.0  | 30.0  | 31.0  | 43.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/06/06 | rainstorm         | 14.0        | 34.0  | 45.0  | 48.0  | 80.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/06/07 | rainstorm         | 16.0        | 37.0  | 51.0  | 56.0  | 57.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/06/08 | rainstorm         | 42.0        | 60.0  | 62.0  | 62.0  | 109.0 |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2014/06/18 | rainstorm         | 19.0        | 22.0  | 29.0  | 29.0  | 29.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/06/22 | rainstorm         | 37.0        | 63.0  | 67.0  | 68.0  | 68.0  |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2014/06/23 | rainstorm         | 68.0        | 125.0 | 150.0 | 156.0 | 159.0 |           | v     | v     | v    | v | v |               |
| 2014/06/29 | rainstorm         | 17.0        | 35.0  | 46.0  | 59.0  | 59.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/06/30 | rainstorm         | 32.0        | 48.0  | 51.0  | 51.0  | 106.0 |           | v     | v     | v    |   |   |               |
| 2014/07/08 | rainstorm         | 17.0        | 23.0  | 26.0  | 34.0  | 46.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2014/07/11 | rainstorm         | 38.0        | 75.0  | 78.0  | 79.0  | 79.0  |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2014/07/23 | Typhoon Matmo     | 13.0        | 26.0  | 44.0  | 74.0  | 109.0 |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/07/31 | rainstorm         | 40.0        | 64.0  | 64.0  | 65.0  | 65.0  |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2014/08/02 | rainstorm         | 23.0        | 45.0  | 45.0  | 45.0  | 45.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/08/11 | rainstorm         | 39.0        | 51.0  | 52.0  | 52.0  | 54.0  |           | v     | v     | v    | v |   |               |
| 2014/08/13 | rainstorm         | 28.0        | 53.0  | 56.0  | 56.0  | 56.0  |           | v     | v     | v    |   |   |               |
| 2014/08/21 | rainstorm         | 16.0        | 22.0  | 24.0  | 24.0  | 24.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2014/09/09 | rainstorm         | 27.0        | 34.0  | 34.0  | 34.0  | 34.0  |           | v     | v     | v    |   |   |               |
| 2014/09/21 | Typhoon Fung-Wong | 59.0        | 112.0 | 128.0 | 167.0 | 209.0 |           | v     | v     | v    | v | v |               |
| 2014/09/24 | rainstorm         | 16.0        | 20.0  | 22.0  | 22.0  | 32.0  |           | v     |       |      |   |   |               |
| 2014/09/24 | rainstorm         | 58.0        | 74.0  | 79.0  | 82.0  | 107.0 |           | v     | v     | v    | v | v |               |
| 2014/10/10 | rainstorm         | 10.0        | 25.0  | 45.0  | 77.0  | 120.0 |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/11/02 | rainstorm         | 11.0        | 30.0  | 39.0  | 58.0  | 67.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2014/11/17 | rainstorm         | 12.0        | 33.0  | 58.0  | 97.0  | 170.0 |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2015/03/23 | rainstorm         | 10.0        | 23.0  | 42.0  | 58.0  | 74.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |
| 2015/05/01 | rainstorm         | 19.0        | 22.0  | 23.0  | 23.0  | 23.0  |           | v     | v     |      |   |   |               |

表 6 各颱風豪雨場次之淺層崩塌分析結果(續)

| 降雨事件              | 最大累積雨量 (mm)             |             |              |              |              | 崩塌<br>Y/N    | 臨界雨量線    |          | 公路總局     |          |          | 本研究<br>$\overline{FS} < 1$ |
|-------------------|-------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
|                   | 1-h                     | 3-h         | 6-h          | 12-h         | 24-h         |              | Hong     | Caine    | 黃        | 橘        | 紅        |                            |
| 2015/05/12        | rainstorm               | 20.0        | 36.0         | 39.0         | 39.0         | 39.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2015/06/07        | rainstorm               | 34.0        | 81.0         | 99.0         | 99.0         | 99.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/06/12        | rainstorm               | 30.0        | 36.0         | 36.0         | 36.0         | 36.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/06/13        | rainstorm               | 95.0        | 131.0        | 131.0        | 131.0        | 167.0        | v        | v        | v        | v        | v        |                            |
| 2015/06/15        | rainstorm               | 20.0        | 29.0         | 29.0         | 29.0         | 29.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2015/06/21        | rainstorm               | 42.0        | 88.0         | 89.0         | 89.0         | 89.0         | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2015/06/23        | rainstorm               | 31.0        | 64.0         | 70.0         | 72.0         | 72.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/07/10        | Typhoon Chan-Hom        | 22.0        | 43.0         | 72.0         | 127.0        | 169.0        | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2015/07/12        | rainstorm               | 32.0        | 68.0         | 80.0         | 81.0         | 82.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/07/26        | rainstorm               | 26.0        | 28.0         | 28.0         | 28.0         | 44.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/07/27        | rainstorm               | 32.0        | 32.0         | 32.0         | 32.0         | 32.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/07/30        | rainstorm               | 51.0        | 52.0         | 52.0         | 52.0         | 52.0         | v        | v        | v        | v        | v        |                            |
| 2015/08/05        | rainstorm               | 22.0        | 22.0         | 22.0         | 22.0         | 22.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| <b>2015/08/08</b> | <b>Typhoon Soudelor</b> | <b>69.0</b> | <b>170.0</b> | <b>298.0</b> | <b>416.0</b> | <b>510.0</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b>                   |
| 2015/08/13        | rainstorm               | 23.0        | 38.0         | 44.0         | 45.0         | 45.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2015/08/18        | rainstorm               | 39.0        | 44.0         | 53.0         | 53.0         | 53.0         | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2015/08/27        | rainstorm               | 28.0        | 42.0         | 44.0         | 48.0         | 66.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2015/09/01        | rainstorm               | 35.0        | 51.0         | 59.0         | 60.0         | 60.0         | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2015/09/02        | rainstorm               | 42.0        | 88.0         | 89.0         | 89.0         | 138.0        | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2015/09/06        | rainstorm               | 19.0        | 50.0         | 58.0         | 78.0         | 90.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2015/09/16        | rainstorm               | 33.0        | 55.0         | 55.0         | 55.0         | 58.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| <b>2015/09/28</b> | <b>Typhoon Djuan</b>    | <b>48.0</b> | <b>122.0</b> | <b>209.0</b> | <b>303.0</b> | <b>388.0</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b>                   |
| 2015/10/09        | rainstorm               | 11.0        | 26.0         | 44.0         | 72.0         | 114.0        | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/01/23        | rainstorm               | 6.0         | 11.0         | 29.0         | 51.0         | 92.0         | v        |          |          |          |          |                            |
| 2016/03/10        | rainstorm               | 7.0         | 22.0         | 34.0         | 61.0         | 103.0        | v        |          |          |          |          |                            |
| 2016/03/13        | rainstorm               | 17.0        | 28.0         | 45.0         | 56.0         | 59.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/04/17        | rainstorm               | 17.0        | 26.0         | 26.0         | 26.0         | 26.0         | v        |          |          |          |          |                            |
| 2016/04/26        | rainstorm               | 31.0        | 56.0         | 56.0         | 56.0         | 58.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2016/04/27        | rainstorm               | 12.0        | 26.0         | 38.0         | 40.0         | 44.0         | v        |          |          |          |          |                            |
| 2016/05/05        | rainstorm               | 19.0        | 28.0         | 47.0         | 49.0         | 49.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/05/10        | rainstorm               | 13.0        | 36.0         | 49.0         | 64.0         | 66.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/05/15        | rainstorm               | 66.0        | 107.0        | 108.0        | 108.0        | 108.0        | v        | v        | v        | v        | v        |                            |
| 2016/05/16        | rainstorm               | 18.0        | 29.0         | 34.0         | 34.0         | 39.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/05/30        | rainstorm               | 18.0        | 37.0         | 41.0         | 58.0         | 58.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/06/08        | rainstorm               | 15.0        | 34.0         | 35.0         | 35.0         | 51.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/06/09        | rainstorm               | 16.0        | 26.0         | 28.0         | 28.0         | 28.0         | v        |          |          |          |          |                            |
| 2016/06/17        | rainstorm               | 32.0        | 73.0         | 97.0         | 106.0        | 106.0        | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2016/06/18        | rainstorm               | 37.0        | 46.0         | 47.0         | 47.0         | 51.0         | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2016/06/20        | rainstorm               | 25.0        | 27.0         | 29.0         | 29.0         | 29.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2016/06/24        | rainstorm               | 16.0        | 30.0         | 30.0         | 30.0         | 30.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/07/02        | rainstorm               | 72.0        | 78.0         | 78.0         | 78.0         | 78.0         | v        | v        | v        | v        | v        |                            |
| 2016/07/11        | rainstorm               | 23.0        | 31.0         | 32.0         | 44.0         | 45.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/07/12        | rainstorm               | 34.0        | 67.0         | 70.0         | 70.0         | 76.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2016/07/14        | rainstorm               | 26.0        | 36.0         | 38.0         | 38.0         | 38.0         | v        | v        | v        |          |          |                            |
| 2016/07/17        | rainstorm               | 35.0        | 39.0         | 39.0         | 39.0         | 39.0         | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2016/07/18        | rainstorm               | 22.0        | 27.0         | 28.0         | 28.0         | 28.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/07/20        | rainstorm               | 16.0        | 30.0         | 30.0         | 30.0         | 30.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/08/06        | rainstorm               | 18.0        | 35.0         | 35.0         | 35.0         | 35.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/08/11        | rainstorm               | 24.0        | 31.0         | 38.0         | 59.0         | 62.0         | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/09/06        | rainstorm               | 43.0        | 61.0         | 71.0         | 74.0         | 74.0         | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2016/09/09        | rainstorm               | 44.5        | 70.5         | 102.0        | 119.5        | 119.5        | v        | v        | v        | v        |          |                            |
| 2016/09/14        | Typhoon Meranti         | 21.0        | 35.5         | 63.5         | 87.5         | 113.5        | v        | v        |          |          |          |                            |
| 2016/09/17        | Typhoon Malakas         | 15.5        | 43.0         | 68.5         | 117.5        | 175.0        | v        | v        |          |          |          |                            |
| <b>2016/09/27</b> | <b>Typhoon Megi</b>     | <b>49.5</b> | <b>126.5</b> | <b>192.0</b> | <b>292.5</b> | <b>365.5</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b> | <b>v</b>                   |

表 7 淺層崩塌預警技術評估結果

| 集水區                  | 警報次數/評估<br>指標 | 崩塌臨界曲線 |       | 交通部公路總局 |       |       | SIMTOP              |
|----------------------|---------------|--------|-------|---------|-------|-------|---------------------|
|                      |               | Caine  | Hong  | 黃色      | 橘色    | 紅色    | $\overline{FS} < 1$ |
|                      | 警報次數          | 161    | 138   | 67      | 37    | 12    | 4                   |
| III<br>(台 9 甲 10.2K) | POD           | 1.000  | 1.000 | 1.000   | 1.000 | 0.330 | 1.000               |
|                      | FAR           | 0.980  | 0.980 | 0.960   | 0.920 | 0.900 | 0.250               |
|                      | TS            | 0.020  | 0.020 | 0.040   | 0.080 | 0.080 | 0.750               |

表 8 結合系集定量降雨預報與淺層崩塌模式之分析事件

| 颱風事件              | 編號     | 警報發布時間 |                  | 警報解除時間 |                  |
|-------------------|--------|--------|------------------|--------|------------------|
| 梅姬<br>(MEGI)      | 201617 | 海上     | 2016-09-25 23:30 | 海上     | 2016-09-28 17:30 |
|                   |        | 陸上     | 2016-09-26 11:30 | 陸上     | 2016-09-28 17:30 |
| 馬勒卡<br>(MALAKAS)  | 201616 | 海上     | 2016-09-15 23:30 | 海上     | 2016-09-18 08:30 |
|                   |        | 陸上     | 2016-09-16 08:30 | 陸上     | 2016-09-18 02:30 |
| 莫蘭蒂<br>(MERANTI)  | 201614 | 海上     | 2016-09-12 23:30 | 海上     | 2016-09-15 11:30 |
|                   |        | 陸上     | 2016-09-13 08:30 | 陸上     | 2016-09-15 11:30 |
| 尼伯特<br>(NEPARTAK) | 201601 | 海上     | 2016-07-06 14:30 | 海上     | 2016-07-09 14:30 |
|                   |        | 陸上     | 2016-07-06 20:30 | 陸上     | 2016-07-09 14:30 |
| 杜鵑<br>(DUJUAN)    | 201521 | 海上     | 2015-09-27 08:30 | 海上     | 2015-09-29 17:30 |
|                   |        | 陸上     | 2015-09-27 17:30 | 陸上     | 2015-09-29 17:30 |
| 蘇迪勒<br>(SOUDELOR) | 201513 | 海上     | 2015-08-06 11:30 | 海上     | 2015-08-09 08:30 |
|                   |        | 陸上     | 2015-08-06 20:30 | 陸上     | 2015-08-09 08:30 |
| 昌鴻<br>(CHAN-HOM)  | 201509 | 海上     | 2015-07-09 05:30 | 海上     | 2015-07-11 11:30 |
|                   |        | 陸上     | 2015-07-09 20:30 | 陸上     | 2015-07-10 23:30 |
| 蓮花<br>(LINF A)    | 201510 | 海上     | 2015-07-06 08:30 | 海上     | 2015-07-09 05:30 |
|                   |        | 陸上     | 2015-07-07 02:30 | 陸上     | 2015-07-07 14:30 |
| 麥德姆<br>(MATMO)    | 201410 | 海上     | 2014-07-21 17:30 | 海上     | 2014-07-23 23:30 |
|                   |        | 陸上     | 2014-07-22 02:30 | 陸上     | 2014-07-23 23:30 |
| 鳳凰<br>(FUNG-WONG) | 201416 | 海上     | 2014-09-19 08:30 | 海上     | 2014-09-22 08:30 |
|                   |        | 陸上     | 2014-09-19 20:30 | 陸上     | 2014-09-22 05:30 |

### 3.3 結合 TAPEX 與 SIMTOP 模式之崩塌預報

如表 8 所示,本研究中應用 2016 年尼伯特、莫蘭蒂、馬勒卡、梅姬颱風;2015 年蓮花、昌鴻、蘇迪勒颱風、杜鵑;以及 2014 年鳳凰、麥德姆颱風等 10 場颱風事件之歷史觀測雨量、系集定量降雨預報資料以及災害紀錄資料,並以海上颱風警報發布與解除時間,進行系集定量降雨預報與淺層崩塌模式分析與驗證。如圖 4 與表 9 所示,依結合系集降雨預報與淺層崩塌模式之預報結果比對實際災害資料,結果顯示 2016 年梅姬颱風、2015 年杜鵑與蘇迪勒颱風等 3 場曾發生坡面

崩塌之颱風事件,對於集水區 III (台 9 甲 10.2K) 之模式預報結果可偵測率(POD)最低為 0.73,誤報率(FAR)最高為 0.33,預兆得分率(TS)最低為 0.53 以及正確率(ACC)最低為 0.90。其餘五場未發生崩塌災害之颱風事件均能準確預測(無過度預報之情形),是以在預測集水區 III (台 9 甲 10.2K)發生之淺層崩塌災害時間上預報,亦有良好的預報結果。

如圖 4 所示,本模式逐時提供未來 6 小時崩塌預警,由於降雨之隨機性較大,不易掌握真實降雨發展或消退趨勢,因此當預報時間愈長,較

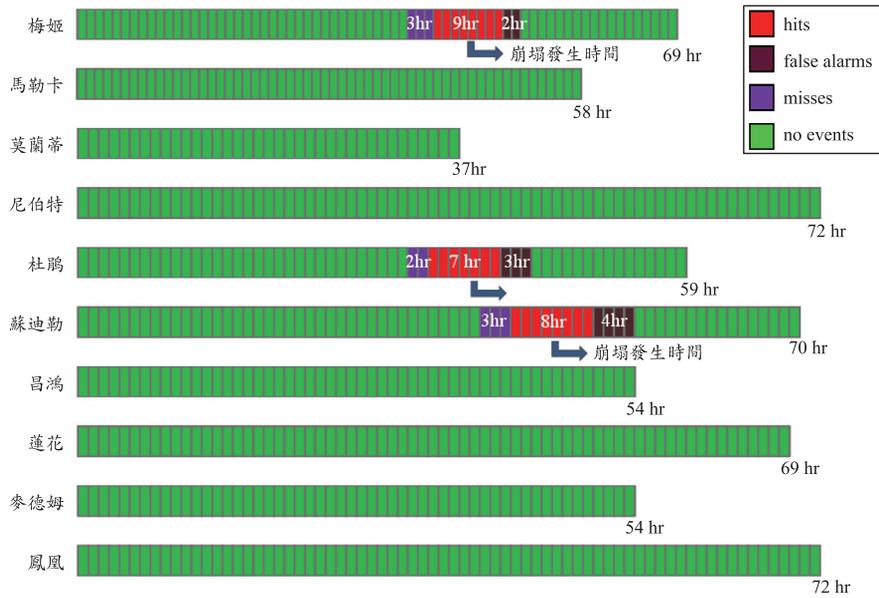


圖 4 結合 TAPEX 與 SIMTOP 模式之分析結果。

表 9 結合系集定量降雨預報與淺層崩塌模式之分析結果

| 颱風場次          | 崩塌發生 | 分析次數 | 誤差矩陣 |              |        |           | 評估指標 |      |      |
|---------------|------|------|------|--------------|--------|-----------|------|------|------|
|               |      |      | hits | false alarms | misses | no events | POD  | FAR  | TS   |
| 梅姬(Megi)      | Yes  | 69   | 9    | 3            | 2      | 55        | 0.75 | 0.18 | 0.64 |
| 馬勒卡(Malakas)  | No   | 58   | 0    | 0            | 0      | 58        | -    | 0.00 | -    |
| 莫蘭蒂(Meranti)  | No   | 37   | 0    | 0            | 0      | 37        | -    | 0.00 | -    |
| 尼伯特(Nepartak) | No   | 72   | 0    | 0            | 0      | 72        | -    | 0.00 | -    |
| 杜鵑(Dujan)     | Yes  | 59   | 7    | 2            | 3      | 47        | 0.78 | 0.30 | 0.59 |
| 蘇迪勒(Soudelor) | Yes  | 70   | 8    | 3            | 4      | 57        | 0.73 | 0.33 | 0.53 |
| 昌鴻(Chan-Hom)  | Yes  | 54   | 0    | 0            | 0      | 54        | -    | 0.00 | -    |
| 蓮花(Linfa)     | No   | 69   | 0    | 0            | 0      | 69        | -    | 0.00 | -    |
| 麥德姆(Matmo)    | No   | 54   | 0    | 0            | 0      | 54        | -    | 0.00 | -    |
| 鳳凰(Fung-Wong) | No   | 72   | 0    | 0            | 0      | 72        | -    | 0.00 | -    |

註：“-”此颱風場次未引致崩塌，因此無法進行 POD 與 TS 評估指標計算

不易獲得準確之估計，是以有崩塌/無預測 (misses)(無法預測未來 6 小時中  $FS < 1$ )均產生在崩塌發生前，而無崩塌/有預測(false alarms)時段 (false alarms) (過度預報)均產生在崩塌發生後。整體而言，此方法可提早至少 4 小時預測崩塌的發

生。

#### 四、結論

本研究所發展具物理架構之 SIMTOP 模式，乃利用高解析度數值高程資料，分別建構地形性

水文模式與坡面穩定分析模式，以模擬降雨期間集水區表層土壤飽和水位與坡面安全係數的變化，藉此預測集水區中發生坡面崩塌之時間與位置。除了能顧及集水區地文特性，並能考慮降雨強度對於飽和水位之變化，以計算其集水區安全係數；因此模式之適用性較為廣泛，有效改進前人坡地災害臨界曲線，僅能適用於某特定水文或地文條件下集水區的限制。研究中應用於新北市烏來區忠治里鄰近 5 處次集水區，無論對於災害發生之時間與位置上，均能有良好的預測結果。此外，藉由 SIMTOP 模式分析結果比對實際災害資料後，以集水區 III (台 9 甲 10.2K) 為例，SIMTOP 模式對於淺層崩塌災害可偵測率(POD)為 1.00，誤報率(FAR)為 0.25，以及預兆得分(TS)高達 0.75。同時，為增加災害應變之所需時間，本研究應用系集定量降雨預測模式，以預測集水區中未來 6 個小時之降雨情形，並結合 SIMTOP 模式進行淺層崩塌預報，建構完整之集水區坡面崩塌即時警戒模式。以集水區 III (台 9 甲線 10.2K) 之 10 場颱風事件測試結果可知，對於崩塌發生時間之可偵測率(POD)為 0.73 以上，誤報率(FAR)為 0.33 以及預兆得分(TS)為 0.53 以上，是以此方法可事先預測可能危險位置與發生災害發生時間，以增加災害應變時間，減少人員傷亡與財產損失。

### 參考文獻

- 李志昕, 洪景山(2011)區域系集預報系統研究：物理參數化擾動，大氣科學，第 39 卷，第 2 期 39(2)，第 95 至 115 頁。
- Apip, Takara, K., Yamashiki, Y., Sassa, K., Ibrahim, H. F. (2010) A distributed hydrological-geotechnical model using satellite-derived rainfall estimates for shallow landslide prediction system at a catchment scale. *Landslides*, 7, 237-258.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J. (1979) A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Sci Bull*, 24(1), 43-69.
- Caine, N. (1980) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, 62, 23-27.
- Cannon, S. H., Ellen, S. (1985) Rainfall conditions for abundant debris avalanches San Francisco Bay Region. *California Geology*, 38, 267-272.
- Casadei, M., Dietrich, W. E., Miller, N. L. (2003) Testing a model for predicting the time and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processed and landforms*, 28, 925-950.
- Ho, J.-Y., Lee, K. T.\* (2017) "Performance evaluation of a physically-based model for shallow landslide prediction, *Landslides*, 14(3), 961-980.
- Hong, Y., Adler, R., Huffman, G. (2006) Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophys. Res. Letter*, 33, L22402.
- Iverson, R. M. (2000) Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36(7), 1897-1910.
- Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brabb, E. E., Brown, W., Ellen, S. D., Harp, E. L., Wiczorek, G. F., Alger, C. S., Zarkin, R. S. (1987) Real time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238, 921-925.
- Kirkby, M. J. (1975) Hydrograph Modelling Strategies In: *Process in Physical and Human Geography* R Peel M Chisholm and P Haggett (Editors), 69-90.
- Lee, K. T. (1998). Generating design hydrographs by DEM assisted geomorphic runoff simulation: a case study, *Journal of the American Water Resources Association*, 34(2), 375-384.
- Lee, K. T., Ho, J.-Y. (2009) Prediction of landslide occurrence based on slope instability analysis and hydrological model simulation. *Journal of Hydrology* 375: 489-497.
- Lee, C.-T., Huang, C. C., Lee, J. F., Pan, K. L.,

- Lin, M. L., Dong, J. J. (2008) "Statistical approach to storm event-induced landslide susceptibility," *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 8, 941-960.
15. Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
16. Schaefer, J. T. (1990) The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather Forecasting*, 5, 570-575.
17. Skempton, A. W., Delory, F. A. (1957) Stability of natural slopes in London clay. *ASCE Journal*, 2, 378-381.
18. Wieczorek, G. F. (1987) Effect of rainfall intensity and duration on the debris flows in central Santa Cruz Mountains California. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7, 93-104.
19. Wilks, D. S. (2005) *Statistical methods in the atmospheric sciences*, second ed., Elsevier.
20. Wu, W., Sidle, R. (1995) A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, 31(8), 2097-2110.
21. Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R., Montrasio, L. (2013) Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese Northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 559-573.

收稿日期：民國 106 年 5 月 9 日

修正日期：民國 106 年 7 月 13 日

接受日期：民國 106 年 7 月 17 日