

# 高解析度水文災害預警模式研發

## The Study of High-resolution Hydrological Disaster Warning Model

主管單位：國家災害防救科技中心

何瑞益 郭文達 林嫩瑛 朱崇銳 張志新

### 摘要

台灣地區因特殊地形、地質與水文條件易於誘發山坡地坍塌，於颱風豪雨侵襲期間，往往造成崩塌等山區災害的發生。本研究採用分形性水文模式與無限邊坡穩定分析理論為基礎，建置 SIMTOP 模式。選用新店溪上游南勢河流域與重大颱風事件進行模式測試，同時採用崩塌捕捉率、誤報率、預兆得分以及正確率，以評估 SIMTOP 模式之崩塌預警能力。研究結果顯示 SIMTOP 模式分析成果與歷史紀錄大致相符。

**關鍵詞：**崩塌預警模式、地形性水文模式、無限邊坡穩定

### Abstract

Taiwan is prone to hillslope disasters in mountain areas because of its special topographical, geological, and hydrological conditions. During typhoons and rainstorms, severe shallow landslides frequently occur. Hence, highly precise landslide prediction is an important method in practice. The SIMTOP model based on infinite-slope model and TOPMODEL was developed. The upstream areas of Xin-Dian river basin and server Typhoon events were selected for the simulation of SIMTOP model. Three indexes including the probability of landslide detection, false alarm ratio, and threat score (TS) were adopted to assess the performance of SIMTOP model. The results indicate that SIMTOP model are good agreement with the landslide records.

**Keywords :** Landslide model, TOPMODEL, Infinite -slope model,

## 一、前言

2015年8月蘇迪勒颱風重創新店溪上游流域，主要降雨中心為烏來區福山(3)雨量站，累積降雨高達778毫米，由於短延時、強降雨造成新店溪上游流域坡地嚴重沖蝕、道路崩塌、土石流及淹水等災情，致使烏來地區形成孤島，其中以省道台9甲10.2k上邊坡集水區崩塌造成道路中斷及人員傷亡等災情最為嚴重，且因南勢溪原水濁度超過淨水場可處理能力，嚴重影響大台北地區供水品質。

前人的崩塌模式大多根據坡地災害發生之水文、地形、地貌與地質等條件訂定準則，如Campbell (1975)與Ellen (1988)調查發現，土石流大部份發生於坡度為26~45度之間；謝等(1992)在花東地區及游與陳(1987)在南投地區調查，發現造成土石流區域其坡度在10~25度、10~20度及17~23度不等。由於降雨特性影響土壤含水量及入滲情形，Caine (1980)蒐集世界各地曾發生土石流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土石流發生之臨界關係。Cannon and Ellen (1985)與Wieczorek et al. (1987)利用相同的方法，調查美國加州多場土石流資料，分析土石流與降雨之關係。Keefer (1987)利用Caine (1980), Cannon and Ellen (1985)及Wieczorek et al. (1987)所收集之資料，以平均降雨強度及降雨延時之關係，建立土石流發生之臨界降雨條件。范與吳(2001)曾以花蓮與台東地區土石流發生情形，探討集水區之水文及地文特性對土石流發生臨界降雨線之影響。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，並應用於台灣中部區域得到良好之山崩預測結果。

## 二、研究地區與研究方法

雖然前人所推導之經驗公式相當重要，可作為坡地災害發生準則，但卻缺乏水文歷程影響坡地災害發生時間與位置之理論架構，且因地表覆蓋改變等因素，經驗公式並無法反應此等現象。因此，近年來坡地災害預測模式乃根據集水區地文、水文、以及土地使用狀況，藉由邊坡穩定理論結合水文架構之物理模式得以建立，以進行坡地災害分析(Montgomery and Dietrich 1994; Wu and Slide 1995)。

Ho and Lee (2017)發展SIMTOP 模式(Shallow landslide prediction based on Infinite slope Model and TOPMODEL)進行淺層崩塌模擬，以模擬降雨期間集水區表層土壤飽和與水位與坡面安全係數的變化，藉此預測新店溪上游集水區中發生坡面崩塌之時間與位置。

本研究延續Ho and Lee (2017) 所發展具物理架構之坡面崩塌分析方法(SIMTOP 模式)，並針對原有模式進行改善，以提高模式之效能與精度。本研究已應用數值高程模式以推求集水區之地文因子，並選用地形指數模式 (TOPMODEL) 以模擬降雨期間集水區表層土壤飽和與水位變化，而後配合物理型坡面崩塌分析模式，以預測颱風洪時期可能引發新店溪上游流域之坡面崩塌時間與範圍。

## 2.1 SIMTOP 物理型崩塌模式

SIMTOP物理型淺層崩塌模式，乃採用改良後無限邊坡穩定分析配合水文模式模擬集水區飽和水位之變化，藉以預測集水區中不穩定之位置與發生時間。無限邊坡穩定分析乃是假設坡地之破壞面平行於地表坡面，並以力平衡概念作為判別邊坡穩定之分析方法。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，故可利用此方法探討邊坡之穩定性。

本研究新增坡面地表逕流對於邊坡穩定之影響，茲將採用Sharma and Nakagawa (2006)之方法，以改良傳統無限邊坡穩定分析，可同時考量地表逕流與未飽和含水層之影響，並依據莫爾-庫倫定律，可將土體之阻滯力  $\tau^*$  表示如下

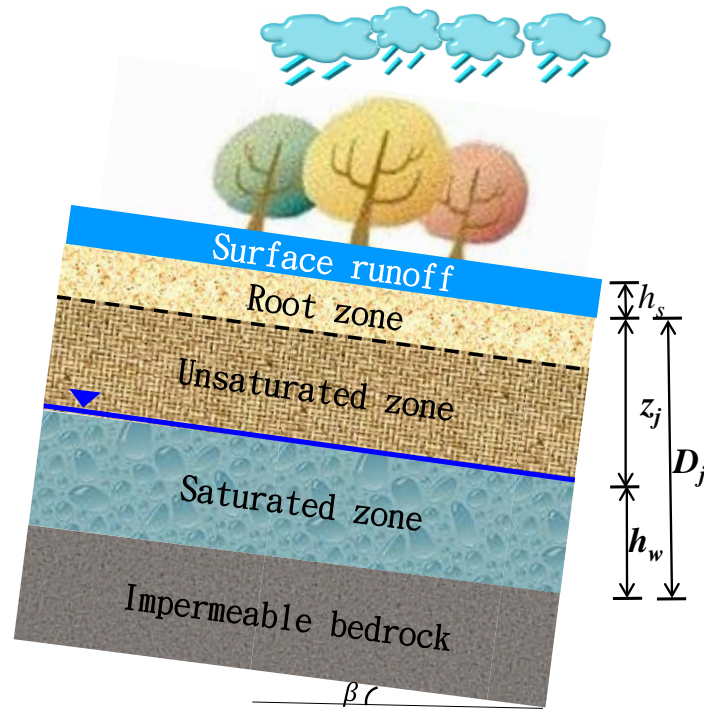


圖 1 無限邊坡穩定分析修正示意圖

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，但為避免集水區水文及地文的空間高度變異性以及格點間相互之影響，本計畫提出以集水區平均安全係數評估集水區淺層崩塌發生與否

$$\overline{FS}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{C_j + g \cos^2 \beta_j (\rho_s D_j - \rho_w h_{w_j} + \rho_w h_{s_j}) \tan \phi}{g \sin \beta_j \cos \beta_j (\rho_s D_j + \rho_w h_{s_j})} \right) \quad (1)$$

式中  $\overline{FS}$  為集水區平均安全係數； $N$  為集水區格點數。由(1)式可知，集水區平均安全係數之時變性質將隨著飽和含水層與地表逕流深度而變動；當集水區平均安全係數  $\overline{FS} = 1$  時，即土體之驅動力等於阻滯力，此時集水區坡面將處於臨界狀態。當土體安全係數之

$\overline{FS} < 1$  時，即土體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  $\overline{FS} > 1$  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。上述無限邊坡穩定分析中之有效凝聚力、土壤密度、水體之密度與有效內摩擦角，可由現地實驗決定；而各格點傾斜坡角可藉由數值高程模式求算；飽和水位高度則可利用下述之地形指數模式進行計算。

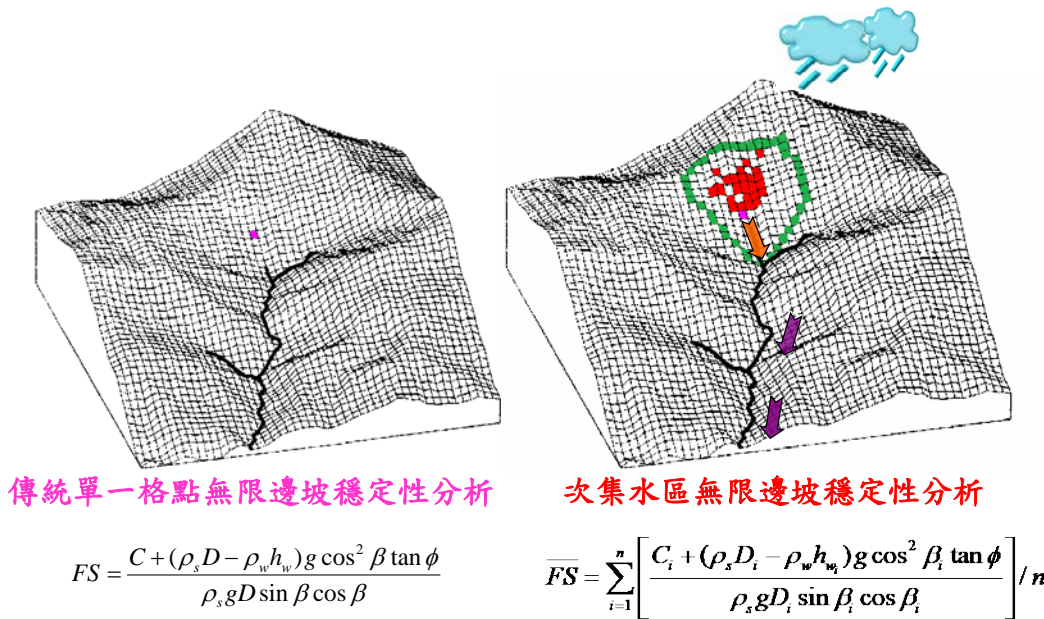


圖2 次集水區無限邊坡穩定分析

## 2.2 評估方法

為評估SIMTOP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)以及預兆得分(Threat Score, TS)等三種評估指標，以確認SIMTOP模式之適用性。

表 1 誤差矩陣表

紀錄 \ 模擬	崩塌	未崩塌
	崩塌	有崩塌/有預測 (Hits)
未崩塌	無崩塌/有預測 (False alarms)	無崩塌/無預測 (No events)

### 三、崩塌模式應用與分析

#### 3.1 研究集水區概述

民國104年8月中颱蘇迪勒挾帶豪雨重創新北市烏來區、造成省道台9甲10.2K處發生嚴重的淺層崩塌與土石流災害，其地理位置位於新店溪上游之南勢溪流域，如圖3所示，而南勢溪流域為新店溪的源流之一，全長約45公里。南勢溪源頭為松羅湖，後與扎孔溪、大羅蘭溪、桶後溪等支流匯集後，與北勢溪交會於新北市新店區，其流域涵蓋新北市烏來區與新店區南端一小部分，流域面積約332平方公里。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。本研究已蒐集新店溪上游南勢溪流域之基本地圖資訊，如行政區界、河川、道路等，亦整理南勢溪流域的水文、地文、地質、土地利用與數值高程等資料。上述相關資料將應用於數值高程模式、地形指數模式及坡面崩塌警戒模式之模擬分析。

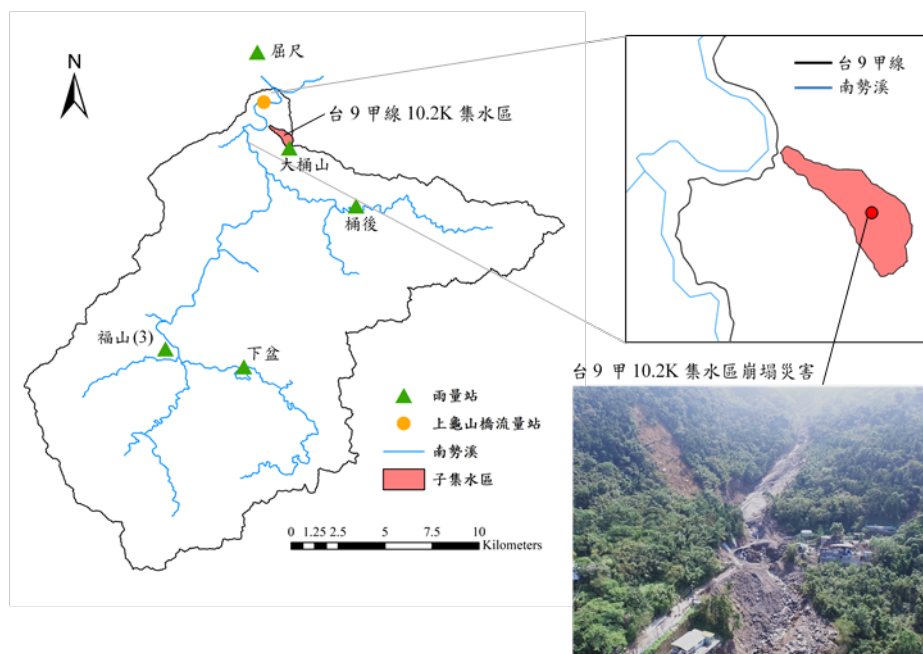


圖3 新店溪上游南勢溪流域與台9線10.2K上邊坡集水區位置

研究中考量雨量站紀錄資料完整性，故選用南勢溪流域內之福山(3)、大桶山、桶後及下盆等四個雨量站之時雨量紀錄資料，應用徐昇多邊形法，針對上龜山橋流量站進行區域平均降雨分析。而上龜山橋流量站之雨量站控制面積如圖4所示。

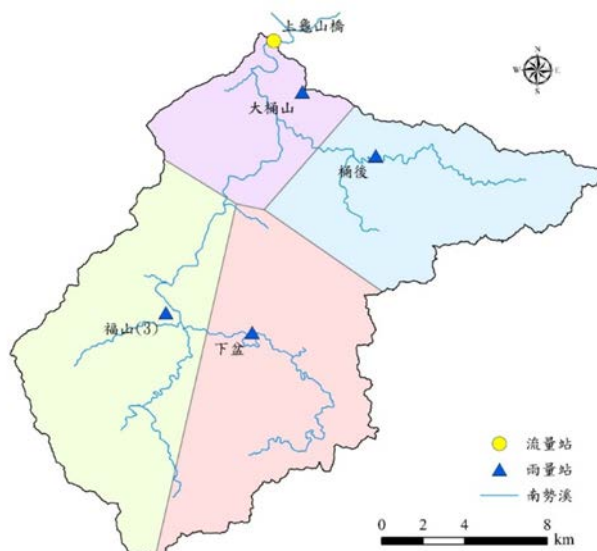


圖4 上龜山橋集水區之徐昇多邊形控制面積

研究中為瞭解地形指數模式於颱風期間之逕流模擬情況，選用85/07/30、86/08/28、87/10/04、89/08/22等四場暴雨場次，進行小時流量之降雨逕流模擬分析。而蒸發散之推估，乃採用台北氣象站的日及小時平均溫度紀錄，代入蒸發散模式以推求集水區之小時蒸發散量。而地形指數模式中平均飽和水位深度需待模式模擬一段時間後，才會趨於穩定平衡；但由於非暴雨時期並無小時水文紀錄資料，且短時距降雨場次的時間基期較短，若任意給定一起始的飽和水位深度，則會因飽和水位深度尚未達平衡狀態，而使模擬結果出現偏差。為避免此現象，在進行地形指數模式之小時流量模擬之前，首先以日紀錄資料進行日流量模擬，待模式趨於穩定後，以日流量模式模擬至暴雨前一天之平均飽和水位深度，為小時流量模式之起始飽和水位深度，藉此使小時流量模式之起始模擬狀態與日流量模式最後一日之狀態相近。

### 3.2 蘇迪勒颱風崩塌模擬與驗證

根據上節分析結果，首先本研究藉由5m x5m高解析度數值高程資料與ArcGIS地理資訊系統系列軟體之ArcHydro模組劃分南勢河流域中各子集水區邊界(各子集水區面積小於1 km<sup>2</sup>)。由分析結果可知，南勢河流域可細分為672個子集水區，分別位於烏來區忠治里、烏來里、孝義里、信賢里、福山里，以及新店區龜山里，其中烏來區忠治里、烏來里、孝義里、信賢里、福山里為內政部於民國108年公告之易成孤島之區域；同時輔以蘇迪勒颱風前後期衛星遙測影像，進行崩塌地判識。由分析結果可知崩塌面積377,955平方公尺，座落於237個子集水區。研究中利用蘇迪勒颱風期間福山(3)、大桶山、桶後及下盆等四個雨量站之時雨量紀錄資料，並計算各子集水區形心與上述四處雨量站之距離，以最短距離之雨量站作為各子集水區之對應雨量站。而後利用本研究所發展之SIMTOP模式進行平均安全係數之模擬，當子集水區平均安全係數=1時，即土體之驅動力等於阻滯力，此時集水區坡面將處於臨界狀態。當土體安全係數之<1時，即土體之驅

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，當安全係數 $>1$ 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。

研究中進行之南勢溪全流域之淺層崩塌模擬與測試。如圖5所示，新店溪上游南勢溪各子集水區可分為四類，分別(1)紀錄有崩塌/預測有預測(Hit)紅色子集水為 191處、(2)紀錄有崩塌/預測無預測(Miss)紫色子集水區為30處、(3)紀錄無崩塌/預測有預測 (False alarm)黃色子集水區為29處、(4)紀錄無崩塌/預測無預測(No events)綠色子集水區為406處。計算可偵測率(POD)為0.864；計算誤報率(FAR)為0.132；以及計算預兆得分(TS)為0.764。而烏來區忠治里、烏來里、孝義里、信賢里、福山里，以及新店區龜山里分析成果詳如表2所示。是以本研究所發展SIMTOP淺層崩塌預警模式之模擬結果與崩塌紀錄大致相符。

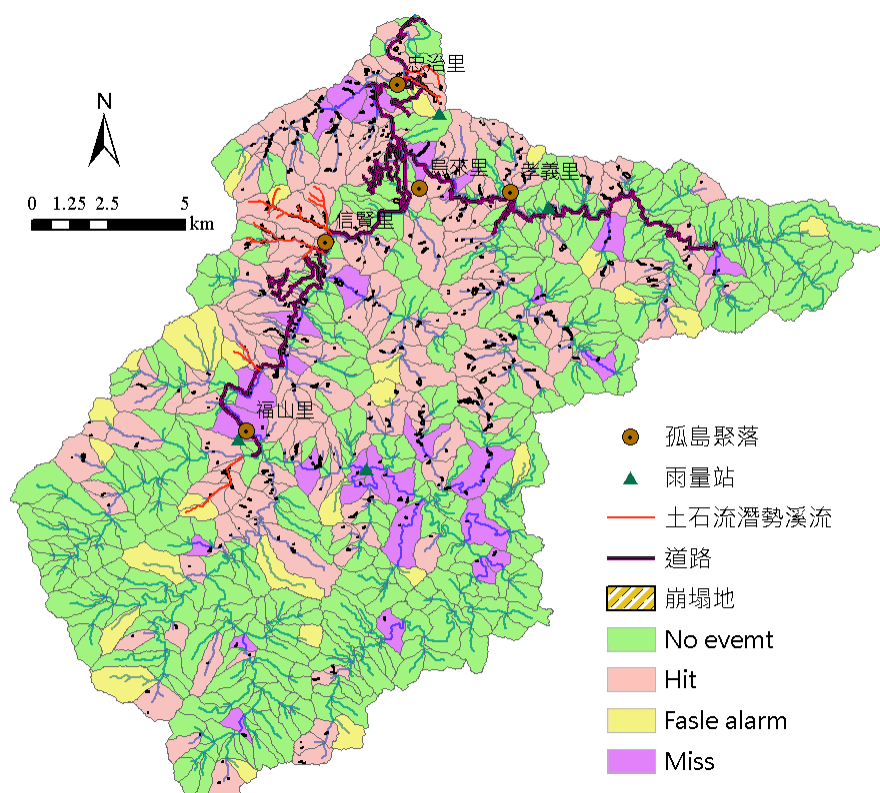


圖 5 蘇迪勒颱風崩塌模式分析成果

表 2 台 9 甲線 10.2K 上邊坡集水區淺層崩塌預警技術評估結果

位置	誤差矩陣				評估指標		
	Misses	No events	Hits	False alarms	POD	FAR	TS
烏來區忠治里	4	21	4	4	0.500	0.500	0.333
烏來區烏來里	1	7	14	0	0.933	0.000	0.933
烏來區信賢里	1	40	32	3	0.970	0.086	0.889
烏來區孝義里	5	119	56	5	0.918	0.082	0.848

烏來區福山里	19	250	83	17	0.814	0.170	0.697
新店區龜山區	0	3	2	0	1.000	0.000	1.000
全區	30	440	191	29	0.864	0.132	0.764

#### 四、結論與建議

本研究建置新店溪上游之南勢溪域淺層崩塌預警模式，且本研究所得之分析結果與災害實際發生時間與位置相符。因此未來可應用本方法，即時發布淺層崩塌發生位置與時間。本年度研究過程中所獲得之結論，可分述如下：

- (1) 針對蘇迪勒颱風於南勢溪全流域淺層崩塌模擬，本研究發展SIMTOP淺層崩塌預警模式之模擬結果大致與崩塌紀錄相符，可偵測率(POD)為0.864，誤報率(FAR)為0.132，以及預兆得分(TS)為0.764。
- (2) 本研究結合無限邊坡穩定分析與地形指數模式，以建立具物理性之淺層崩塌預警模式，可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，以計算集水區的平均安全係數變化；有效改進前人之降雨門檻指標和降雨強度延時臨界曲線，僅能適用於某特定水文或地文條件下之集水區的限制。
- (3) 針對台9甲10.2K上邊坡集水區為例，應用民國99年至107年期間的分析成果比對實際災害紀錄後，SIMTOP模式之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)為0.75，表示本模式有良好預測之結果。

#### 參考文獻

1. 何瑞益、林郁峰、林忠義、黃琇蔓、蕭玲鳳、李光敦 (2019)。雷達資料同化技術之極短期定量降雨預報於淺層崩塌預警應用研究。台灣水利，67(2)，9-20。
2. 范正成、吳明峰 (2001)。一級溪流土石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。
3. 謝正倫、江志浩、陳禮仁 (1992)。花東兩縣土石流現場調查與分析。中華水土保持學報，23(2)，109-122。
4. 游繁結、陳重光 (1987)。豐丘土石流災害之研究。中華水土保持學報，18(2)，76-92。
5. Apip, Takara, K., Yamashiki, Y., Sassa, K., Ibrahim, A. B., Fukuoka H. (2010). A distributed hydrological-geotechnical model using satellite-derived rainfall estimates for shallow landslide prediction system at a catchment scale. Landslides, 7, 237-258.
6. Beven, K. J. (1997). TOPMODEL: a critique, Hydrological Processes, 11, 1069-1085.
7. Caine, N. (1980). The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography, 23-27.
8. Campbell, R. H. (1975). Soil slips, debris flow, and rainstorms in the Santa Monica Mountain and vicinity, Southern California. U. S. Geological Survey Professional Paper, 851.



9. Cannon, S. H. & Ellen, S. (1985). Rainfall conditions for abundant debris avalanches. San Francisco Bay Region, California. *California Geology*, 38, 267-272.
10. 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.
11. Chiang, S. H. & Chang, K. T. (2009). Application of radar data to modeling rainfall-induced landslides. *Geomorphology*, 103, 299-309.
12. Ellen, S. D. & Wieczorek, G. K. (1988). Landslides, floods, and marine effects of the storm of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay Region, California. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1434.
13. Ho, J.-Y., Lee, K T, Chang, T-C, Wang, Z.-Y., Liao, Y.-H. (2012). Influences of spatial distribution of soil thickness on shallow landslide prediction. *Engineering Geology*, 124, 38-46.
14. Ho, J. Y. & Lee, K. T. (2017). Performance evaluation of a physically based model for shallow landslide prediction. *Landslides*, 14(3), 961-980.
15. Hong, Y., Adler, R., Huffman, G. (2006). Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, 33(22), L22402.
16. Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour. Res.*, 36(7), 1897-1910.
17. Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brabb, E. E., Brown, W. M., Ellen, S. D., Harp, E. L., Wieczorek, G. F., Alger, C. S., Zatkan, R. S. (1987). Real time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238, 921-925.
18. 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.
19. Lee, K. T., & Ho, J. Y. (2009). Prediction of landslide occurrence based on slope-instability analysis and hydrological model simulation. *Journal of Hydrology*, 375(3), 489-497.
20. Montgomery, D. R. & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding," *Water Resour. Res.*, 30(4), 1153-1171.
21. Skempton, A. W. & Delory F. A. (1957). Stability of natural slopes in London clay. *ASCE*, 2, 378-381.
22. Wu, W. & Sidle, R. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resour. Res.*, 31, 2097-2110.
23. 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.

精簡報告格式

- 1.檔案格式 word
- 2.單欄，最少 8 頁最多 15 頁(含圖表、參考文獻)。
- 3.內容需有中英文摘要。
- 4.檔名：精簡報告-計畫名稱.doc, 精簡報告-計畫名稱.pdf