

應用 TRIGRS 程式於邊坡破壞機率分析-以奧萬大地區為例

陳則佑 馮正一* 莊育蓁

摘要 本研究應用 TRIGRS 程式，模擬奧萬大地區受到 2008 年辛樂克颱風豪雨襲擊時對邊坡穩定性之影響，探討其破壞機率。為增加模擬之可靠度，採用地形指數推估土壤厚度與初始入滲率，並配合現地勘查與遙測資料進行分區，使參數之假設可較符合現況。本研究以破壞機率來描述邊坡之穩定性，使用 Rosenblueth 點估法來考量強度參數變異性。研究結果指出奧萬大地區風化板岩透水性佳，邊坡穩定受零星降雨影響有限，且累積降雨量與崩塌面積並非完全成正比。陡峭區域受到少量降雨其破壞機率即會升高；較緩的邊坡必須有充足之雨量，破壞機率才會明顯的升高。對於 TRIGRS 程式於奧萬大之崩塌源頭區之應用，本研究分析所得崩塌區位與實際崩塌區位之比對良好。以 TRIGRS 評估邊坡之穩定性，在不符合無限邊坡條件的區位，其評估結果有較大的誤差。

關鍵詞：TRIGRS、破壞機率、奧萬大、辛樂克颱風。

An Application of TRIGRS on Slope Failure Probability Analyses - A Case Study of Aowanda

Tse-Yu Chen Zheng-Yi Feng* Yu-Chen Chuang

ABSTRACT This study applied the TRIGRS code to simulate the slope stability of the Aowanda area under heavy rainfall during Typhoon Sinlaku in 2008. To increase simulation reliability, this study adopted the topography index to estimate soil thickness and initial infiltration rate. In addition, zonation for analysis was made according to the field investigation and remote sensing data for better assuming the simulation parameters relating to the in-situ condition. This study used the Rosenblueth point estimate method to evaluate the failure probability with considering variances of the parameters. The permeability is high in the weathered slate formation of Aowanda. Slope stability is less influenced by scattering rainfalls. The cumulative rainfall and the landslide area are not necessary proportional. For steep slopes, the failure probability will increase, even with only average rainfall. In contrast, for gentle slopes, the failure probability will gradually increase only after a significant amount of rainfall. The comparison between the calculated and actual landslide area is satisfied using TRIGRS for the landslide source areas of Aowanda. If the slopes do not fulfill the infinite slope assumption when applying TRIGRS for landslide evaluation, more deviated results could occur.

Key Words: TRIGRS, failure probability, Aowanda, Typhoon Sinlaku.

一、前言

在過去關於山坡地崩塌潛感分析之相關研究已有許多學者 (Lee, 2008, Liu and Wu, 2008; 朱聖心, 2001) 踏入此範疇內。一般而言, 在繪製山崩潛感圖區主要分為兩種, 分別為統計法與定值法, 而本研究使用較具客觀性且較有物理意義的定值法, 但缺點為參數較不易取得, 如何克服分析參數變異的問題成了本研究之課題。降雨為邊坡破壞之影響因子, 然在邊坡上需降下多少降雨量才會達到不穩定之評估即顯得重要。

本研究地點選定於台灣中部地區之奧萬大區域, 該區丘陵高山遍佈, 地形變異大, 經由河川之侵蝕作用與人為之道路開發, 使得崩塌災害頻傳, 在 2008 年辛樂克颱風後造成奧萬大森林遊樂區聯外道路邊坡穩相當大的災害, 因此本研究選定奧萬大區域之道路邊坡做為研究對象。

本研究使用美國地質調查所 (USGS) TRIGRS 程式 (Baum, et al., 2008) 進行分析。TRIGRS 可考慮暫態降雨, 經由時間分割後可對於單場之累積降雨獲得邊坡穩定性之判釋。本研究以地形指數與 Rosenblueth 點估法來考慮強度參數的變異, 分析結果以破壞機率來代替安全係數進行詮釋, 最後使用定量指數與 ROC 曲線來評論 TRIGRS 模擬結果之準確性與適用性。

二、研究區域環境

1. 試區簡介

本研究區位於南投縣仁愛鄉親愛村內, 為濁水溪流域之上游地區萬大溪北側之集水區範圍內。此區位於中央山脈西側與西部沖積平原之間, 海拔高度介於 1000m 至 2200m 間, 根據經濟部中央地質調查所 (2010) 之調查報告顯示, 此區地質分區以盧山層與大禹嶺層為主, 板岩與黑色硬頁岩為主要之構成物, 岩層經由流經其中之萬大溪所造成之下切、風化作用下, 使得區域之地勢變化極為複雜。由於 1999 年 921 大地震致使地層破碎之影響, 使得該區邊坡狀態顯得不穩定, 在發生暴雨時, 岩土崩塌和土石流常被誘發, 是為崩塌頻繁之地區。本研究區位詳見圖 1。

2. 崩塌地現地調查與區位分析

為瞭解近年來研究區域之崩塌區位與變遷, 本研究先使用 2007~2008 年之衛星影像進行崩塌地判

釋, 並配合相關地形資料與現勘調查進行綜合分析。由崩塌區位判釋結果 (圖 2) 得知崩塌大多沿著萬大溪、野溪與大安路 (奧萬大森林遊樂區主要聯外道路)

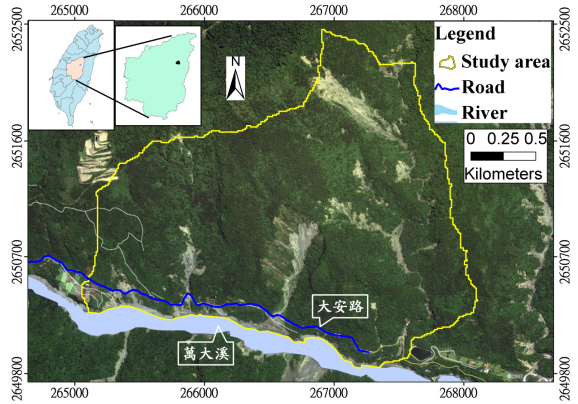


圖 1 研究區域位置圖 (擷取自 Google Earth 2011 年衛星影像)

Fig.1 Location of the study area

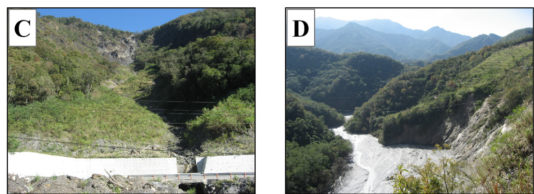
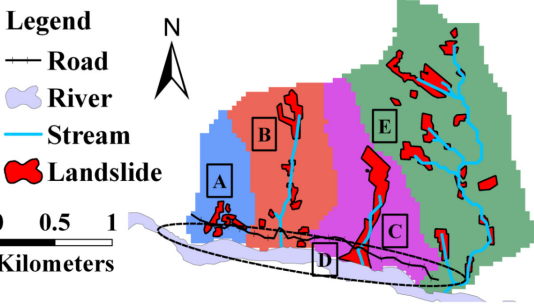
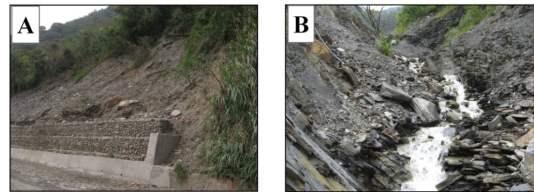


圖 2 崩塌地分區區位 (A 為 0+6.9k 研究分區與現地照片; B 為 0+7.6k 研究分區與現地照片; C 為 0+8.6k 研究分區與現地照片; 虛線橢圓框 D 為聯外道路下方之研究分區與現地照片; E 為腦寮溪區域研究分區)

Fig.2 Zonation of the landslide study area

分佈，共 32 個崩場地，總計 339,448 m²。此外，作者於 2010 年 10 月與 11 月沿著聯外道路實際勘查後，將研究區分為 5 個不穩定區域，分別位於聯外道路 0+6.9k、0+7.6k、0+8.6k 上邊坡處與聯外道路下邊坡處 0+4.5k 到森林遊樂區門口。其現場狀態描述如下：

- (1) 調查聯外道路 0+6.9k 之上邊坡處，發現此區之板岩呈現嚴重破碎之中度至高度風化狀態，沿線擋土牆已部分傾倒或遭土石撞擊損壞，詳見圖 2A。且鑽探資料 (林務局南投林區管理處，2010) 判釋此區之地層可分為風化層、崩積層、破碎板岩與未風化板岩等四層。
- (2) 第二個不穩定區域位於聯外道路 0+7.6k 處 (圖 2B)，其上邊坡有一條萬大溪之支流貫穿，不穩定區域包含聯外道路以北之萬大溪支流沿岸。聯外道路與萬大溪之支流交會處，於衛星影像 (2007 年 8 月) 聯外道路呈現為上凸狀，顯示過去可能因支流匯合至萬大溪，造成聯外道路受到河道下切與沖刷作用因而破損。目前此交會處建有排水設施以降低破壞之可能。
- (3) 聯外道路 0+8.6k 處及上方之支流沿岸為本研究試區內最大之崩場地 (圖 2C)，此支流上游處較為陡峭，下游處則趨於平坦，並堆積有大量上方崩落之土石，若受到大雨誘發則容易造成崩塌或土石流。
- (4) 研究區域內最右側的腦寮溪 (圖 2E)，由 2007 到 2010 的衛星影像圖判釋，每當豪大雨過後原本的崩場地都有擴大的跡象，其中以辛樂克颱風後新增之崩場地為最多。
- (5) 本研究區之第 5 個不穩定區為聯外道路之下方 (圖 2D)，此區由於道路開闢與萬大溪常年沖刷之影響，崩塌隨處可見。2007 年時河道最寬為 120m，到了辛樂克颱風之後，河道最寬達到 230m (林務局南投林區管理處，2010)。這顯示此區極易因急促之水流淘刷，導致邊坡坡趾流失，邊坡上方土石進而大量向下滑移，滑落的土石常導致土石淤積。

3. 降雨

奧萬大地區歷次發生重大災情大多為暴雨所誘發。本研究分析中央氣象局之奧萬大氣象觀測站 2007 年至 2008 年之雨量資料，發現單一整場降雨前四大者，皆為颱風所引起 (表 1)。其中辛樂克颱風更於

2008 年 24 小時內帶來 526mm 之降雨量，歸類於「超大豪雨」。本研究將以此場降雨為模擬對象，其降雨歷時曲線詳見圖 3。

三、研究方法

1. 無限邊坡穩定分析程式與分析參數

(1) TRIGRS 分析

TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model) 為美國地質調查所 (Baum *et al.*, 2008) 所開發之網格式無限邊坡穩定分析程式，可計算降雨下之暫態邊坡穩定係數。TRIGRS 程式之理論與公式眾多，其詳細說明與公式推導，請詳見 TRIGRS 文件 (Baum *et al.*, 2008)。本研究採用 TRIGRS 2.0 為主要之計算工具，考量地層強度參數之不確定性，計算奧萬大風化板岩地層之道路邊坡在降雨下之破壞機率。因為風化板岩孔隙大，不飽和地層對強度之影響因而較小，故本研究不考慮地層不飽和區之影響。

(2) TRIGRS 之輸入參數

TRIGRS 在應用時須要輸入多種參數，然而大多數參數不易取得，或無法完全適用於全部的研究區內。故除現地採集外，彙整前人之相關研究亦可有效取得合理輸入參數。以下將對本研究所必須確認之多項參數，包含土壤厚度、地下水位、初始入滲率、土壤參數 (凝聚力、摩擦角與土壤單位重) 與土壤水力參數 (水力傳導度和水力擴散度) 等，敘述其定義與取得方法。

① 土壤厚度

由於 TRIGRS 目前僅分析淺層地層之穩定狀態，故土壤厚度假設對於分析結果有很大的影響。一般山地區域，土壤之生成多與坡度地勢有關。為合理的推估研究區域之土壤厚度，本研究採用 Lee and Ho (2009) 所使用之網格式土壤厚度推估方法進行推估。該方法應用 Beven and Kirkby (1979) 所提出之地形指數模式 (TOPMODEL)，並考量土壤厚度於河道地區為最厚，山頂地區較薄之假設，而得到土壤厚度與地形指數的關係式如下：

$$D_j = C_s \times \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) \quad (1)$$

(1)式中 D_j 為 j 格點之土壤厚度、 a 為流經 j 點位置單位寬度之集流面積、 $\tan \beta$ 為坡度、 C_s 為待定係數，並假設地形指數與土壤深度呈線性關係來推求土壤厚度。

奧萬大區域由於表層多為破碎板岩之崩積層與風化層，本研究並未進行鑽掘調查，但採用現場目視勘查方式進行研究區土壤厚度之調查；而坡度方面則採用既有 DEM 分析來求得坡度。本研究以現場調查的 19 個點

位資料，經由迴歸分析將待定係數 C_s 評估為 0.357 (圖 4)。將此模式應用於研究區域之土壤厚度推估結果如圖 5。

② 穩態地下水位深度

奧萬大地區地表有數條野溪通過，地下水位變化幅度差異大，其實不易明確指定。本研究所使用之常時地下水位深度，參考 (林務局南投林區管理處, 2010) 之報告書監測結果，其中指出聯外道路 0+6.9k 處之地下水位變化界於地下 44m 至 53m 之間，故假設試區之常時地下水位面位於地下 45m 處。

表 1 奧萬大 2007 ~ 2008 年重大颱風事件

Table 1 Typhoon events during 2007 ~ 2008 in Aowanda

颱風名稱	陸上颱風警報時間 (年/月/日)	降雨時數 (hr)	最大雨量分級
柯羅莎 (Krosa)	2007/10/5	68	豪雨 (188.5mm)
卡玫基 (Kalmaegi)	2008/07/17	43	超大豪雨 (361mm)
鳳凰 (Fung-Wong)	2008/07/27	58	大豪雨 (288mm)
辛樂克 (Sinlaku)	2008/09/12	88	超大豪雨 (526mm)

註：中央氣象局雨量分級標準：豪雨為 50mm 以上、1 小時至少有 15mm 的降雨發生；大豪雨為 24 小時累積降雨 200mm 以上；超大豪雨為 24 小時累積降雨 350mm 以上。

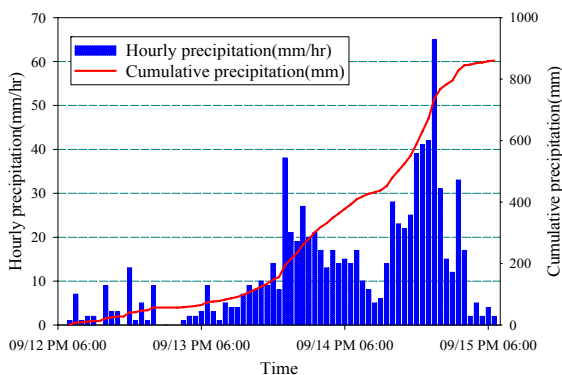


圖 3 辛樂克颱風 2008/9/12/18:00~2008/9/15/18:00 降雨紀錄圖 (中央氣象局奧萬大雨量站)

Fig.3 Rainfall of Sinlaku from September 12, 2008 to September 15, 2008

表 2 前人研究採用之水力傳導度

Table 2 Hydraulic conductivities adopted in literatures

參考文獻	水力傳導度 K(m/s)	岩土種類
Iverson (2000)	10^{-4}	回填壤土砂 (reconstituted loamy sand)
Chen <i>et al.</i> (2005)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	砂岩風化後之土壤 (sandstone weathered soil)
吳佳郡 (2006)	10^{-4}	板岩
王嫻兮 (2007)	1.0365×10^{-4}	泥岩石質土與裸岩
鍾欣翰 (2008)	9×10^{-4}	頁岩與砂岩為主

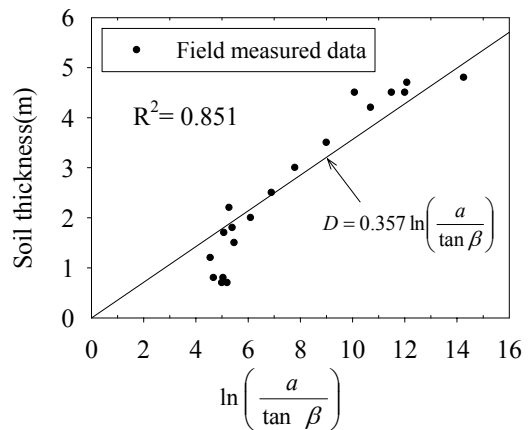


圖 4 奧萬大地區調查 19 點位土壤厚度與地形指數之關係

Fig.4 The relationship between soil thickness and topographic index of the 19 locations investigated in Aowanda

③ 土壤水力參數

TRIGRS 程式中所使用的土壤水力參數主要分為二種，分別是水力傳導度 K 和水力擴散度 D 。本研究彙整前人研究 (表 2) 發現崩積層與風化層的水力傳導度大約落在 10^{-4} m/s 到 10^{-6} m/s 之間。由於本研究探討對象以崩積層為主，故假設區域之水力傳導度為 10^{-4} m/s。此外，參考前人研究 (吳佳郡，2006；鍾欣翰，2008) 發現土壤水力擴散度與水力傳導度約略有正比之關係；而在不同環境條件下，水力傳導度也有可能約有 10 倍至 400 倍之變異。本研究採用水力傳導度假設為 10^{-4} m/s，而水力擴散度假設為 $10^{-2}m^2/s$ 。

④ 土壤初始入滲率

土壤初始入滲率可顯示土壤之長時間含水狀態，一般使用時，通常會假設土壤初始入滲率小於或等於飽和水力傳導度一個次方以上，且於極乾燥地方可以合理假設為零。本研究為合理假設初始入滲率，參考了 Chen *et al.* (2005)、Liu and Wu (2008) 與鍾欣翰 (2008) 等人之相關研究，將初始入滲率假設分為下列幾個狀態：

- a. 分析事件前累積降雨量超過 500mm，初始入滲率假設與土壤水力傳導度相同。
- b. 分析事件前累積降雨量落在 100~500mm 間，初始入滲率假設為土壤水力傳導度之 0.01 倍。
- c. 分析事件前呈現零星降雨，初始入滲率假設為 $10^{-8}m/s$ 。

依據中央氣象局奧萬大氣象站得知發生辛樂克颱風前 40 天呈現零星降雨且累積降雨量只有 132mm。本研究在考慮萬大溪支流低窪處土壤長期較為濕潤之下，假設其土壤初始入滲率為水力傳導度之 10^{-4} 倍率；而在靠近山頂處因土層較薄，土壤含水較少，假設其土壤初始入滲率為 10^{-8} m/s。而本研究在指定各不同土壤厚度之初始入滲率時，再假設土壤厚度與上述之間呈一「指數函數」關係，故將介於 10^{-4} 至 10^{-8} m/s 以「指數函數」對應到 1~5m 的土壤厚度，以估算初始入滲率，此為作者主觀之假設。本研究假設之初始入滲率如圖 6 所示。

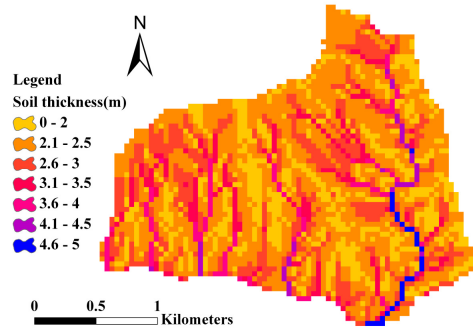


圖 5 土壤厚度估計結果 (單位：公尺)
Fig.5 The evaluation result of soil thickness (Unit: m)

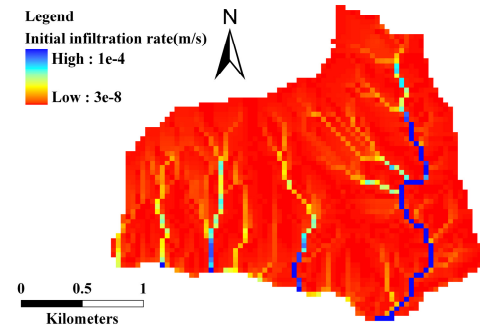


圖 6 初始入滲率假設 (單位：公尺/秒)
Fig.6 The assumed initial infiltration rate (Unit: m/s)

Zone	Cohesion (kN/m ²)		Friction angle(°)		Soil unit weight(kN/m ³)
	Mean	Cov(%)	Mean	Cov(%)	
Zone 1	10	30	30	20	20.1
Zone 2	13	20	30	15	20.1
Zone 3	15	10	32	10	20.1



圖 7 地層強度參數分區 (區域 1、區域 2 和區域 3 的土壤凝聚力 (變異係數) 為 10 (30%)、13 (20%) 和 15 (10%)、土壤摩擦角 (變異係數) 為 30 (20%)、30 (15%)和 32 (10%)、土壤單位重為 20.1 kN/m³)
Fig.7 The assumption of the strength parameters of the study zones

⑤ 地層強度參數

由於研究區域涵蓋多種地形變化, 若使用單一的土壤力學參數, 則無法考量強度參數之變異性。因此本研究利用 ArcGIS 的水文分析模組 (ArcHydro Analyst) 將研究區域劃分成多個不同的研究分區, 並依地形變化來區分為三種類型, 分別為 Zone 1 大量崩塌區和野溪區、Zone 2 聯外道路開發區與 Zone 3 植生覆蓋完整區 (圖 7)。再參考與研究試區相似之地層材料參數, 選用中興工程顧問公司 (2004) 於南投縣法治村所使用地層強度之參數。針對摩擦角與凝聚力變異係數, 本研究參考 Duncan (2000), Husein Malkawi *et al.* (2000), Liu and Wu (2008) 與 Cho (2010) 等對參數變異區間之研究, 設定上述分區之強度參數與變異係數。

2. Rosenblueth 點估法

點估法是由 Rosenblueth (1975) 所提出。主要以一個正標準差 (standard deviation) 與一個負標準差之兩個採樣點來表示某一隨機變數的機率密度函數 (probability density function)。點估法減少了其他如蒙地卡羅法之大量的採樣與計算次數, 且可得到仍然不錯的評估結果。若將點估法應用於雙隨機變數邊坡破壞機率計算時可寫為下式:

$$F = g(X, Y) \quad (2)$$

其中 F 為安全係數, 雙變數為 X (凝聚力) 和 Y (摩擦角)。考量正負標準差的 4 種組合 ($F_{++}, F_{+-}, F_{-+}, F_{--}$), 以平均值 \bar{X} 和 \bar{Y} 和標準偏差 σ_X 和 σ_Y 將 (2) 式改寫成 (3) ~ (6) 式:

$$F_{++} = g((\bar{X} + \sigma_X), (\bar{Y} + \sigma_Y)) \quad (3)$$

$$F_{+-} = g((\bar{X} + \sigma_X), (\bar{Y} - \sigma_Y)) \quad (4)$$

$$F_{-+} = g((\bar{X} - \sigma_X), (\bar{Y} + \sigma_Y)) \quad (5)$$

$$F_{--} = g((\bar{X} - \sigma_X), (\bar{Y} - \sigma_Y)) \quad (6)$$

若要考慮雙變數間的相關性, 可將 4 個組合分別乘上 $P_{++}, P_{+-}, P_{-+}, P_{--}$, 並將結果相加即可得到安全係數之期望值 E , 如下式:

$$E[F] = P_{++}F_{++} + P_{+-}F_{+-} + P_{-+}F_{-+} + P_{--}F_{--} \quad (7)$$

$$\text{其中 } P_{++} = P_{--} = \frac{1}{4}(1 + \rho_{XY}) \quad (8)$$

$$P_{+-} = P_{-+} = \frac{1}{4}(1 - \rho_{XY}) \quad (9)$$

ρ_{XY} 為 X 和 Y 之關聯係數。若關聯係數 ρ_{XY} 為零, 表示該雙變數並無關聯性。 $P_{++}, P_{+-}, P_{-+}, P_{--}$ 均為 $1/4$ 。根據 Husein Malkawi *et al.* (2000)、Chen *et al.* (2007) 與蘇歆婷 (2007) 指出, 雖然地層參數 (凝聚力與摩擦角) 與地下水位相關, 但在缺乏地層參數之相關性資料下, 各參數簡化為相互獨立。安全係數之變異數 $\text{Var}[F]$ 可由期望值的平方 $E[F^2]$ 減去 $E[F]^2$ 得到, 其公式如下:

$$\text{Var}[F] = E[F^2] - (E[F])^2 \quad (10)$$

$$E[F^2] = P_{++}F_{++}^2 + P_{+-}F_{+-}^2 + P_{-+}F_{-+}^2 + P_{--}F_{--}^2 \quad (11)$$

將變異數 $\text{Var}[F]$ 取平方根, 可得安全係數之標準偏差 $\sqrt{\text{Var}[F]}$ 。邊坡之破壞機率即可由安全係數之期望值、標準差來計算。

3. 定量分析

(1) 定量指數

為了將諸次模擬成果定量呈現, 本研究將破壞機率區分為穩定區域與不穩定區域。定量方式採用 Sorbino *et al.* (2007) 所提出的定量指數 (quantitative indexes) 來評估。此定量指數是由成功指數 SI (success index) 和錯誤指數 EI (error index) 所構成。SI 為成功指數, 其定義為集水區內實際的崩塌地內模擬不穩定區域 A_{in} 和實際崩塌地 A_{inst} 的面積比。錯誤指數 EI 的定義為集水區內實際崩塌地外模擬為不穩定區域 A_{out} 和實際非崩塌地區域 A_{stab} 的面積比, 其公式如下, 示意圖如圖 8:

$$SI = \frac{A_{in}}{A_{inst}} \times 100 \quad (12)$$

$$EI = \frac{A_{out}}{A_{stab}} \times 100 \quad (13)$$

若考慮整個集水區的定量指數, 可以將公式 (12, 13) 更改成:

$$SI_m = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{m,i}}{A_{inst,i}} \right)}{n} \times 100 \quad (14)$$

$$EI_m = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{A_{out,j}}{A_{stab,j}} \right)}{n} \times 100 \quad (15)$$

其中 n 為所有 SI 累加的數量； m 為所有 EI 內累加的數量。 SI_m 和 EI_m 則是區域內所有的成功指數和錯誤指數，由 SI_m 和 EI_m 即可用以定量評估針對某一大區域的預測能力。

(2) ROC 曲線

利用定量指數分析只能判定分析的結果好壞，不能直接瞭解分析模型的好壞程度。因此本研究使用 Swets (1961) 所提出的 ROC 曲線 (receiver operating characteristic)。將研究區域內數個集水區內崩塌地之成功指數與錯誤指數，切割成若干等間距之分割，由小到大累加計算即可繪製成 ROC 曲線，在 ROC 曲線中曲線下的面積簡稱為 AUC (the area under the curve)，面積愈大表示判釋正確比例愈高，而面積小於 50% 則表示為模型不大適用 (圖 9)。

四、結果與討論

本研究採用 40×40 m 網格進行 TRIGRS 程式分析，模擬奧萬大地區受到辛樂克颱風 0 到 72 小時，邊坡受到雨水入滲後邊坡穩定的情形。在模擬過程中採用地形指數模型、地層強度參數分區與使用點估法考慮參數的不確定性，來克服參數缺乏與參數變異之問題，最後模擬結果分別以破壞機率探討累積降雨量、坡度與和定量指數與 ROC 曲線。

研究結果以破壞機率 60% 以上為不穩定區域，破壞機率 60% 以下為穩定區域，36、42、48 和 60 小時之模擬結果如圖 10。為了增加判釋能力，將模擬降雨時間 30 小時到 60 小時之間，每 6 個小時模擬出來的破壞機率繪製成圖 11，橫座標表示為研究區域內之破壞機率，而縱坐標表示為研究區域內破壞機率累積百分比。由圖 11 可看出尚未降雨時奧萬大區域之破壞機率均小於破壞機率 5%，而提高累積降雨後以破壞機率 95% 最為敏感，因此使用每 6 小時之累積降雨量與破壞機率 5% 與 95% 來詮釋奧萬大區域之累積降雨量。

1. 累積降雨量

累積降雨量與雨水入滲量有關係，由不同時間的累積降雨量，可瞭解奧萬大地區在雨水入滲後邊坡穩

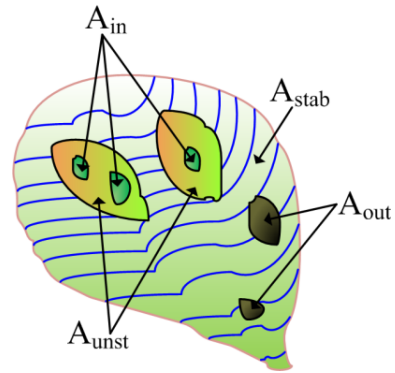


圖 8 定量指數示意圖 (modified from Sorbino *et al.*, 2007)

Fig.8 A conceptual sketch of the quantitative indexes

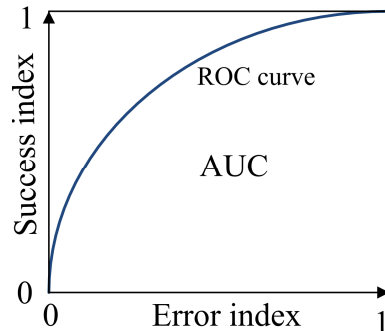


圖 9 ROC 曲線示意圖 (修改自林衍斌, 2009)

Fig.9 A conceptual sketch of receiver operating characteristic

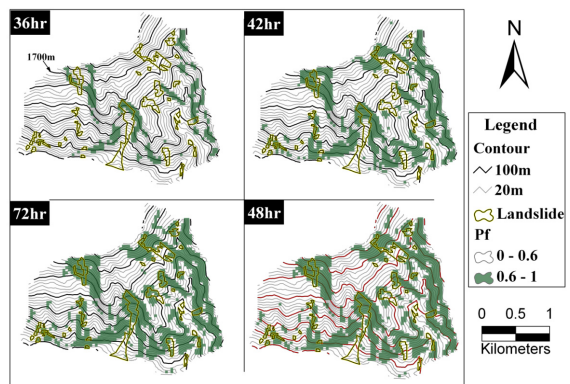


圖 10 降雨 36、42、48 和 72 小時後破壞機率模擬結果

Fig.10 The failure probability plots at the end of 36, 42, 48, and 72-hour simulations

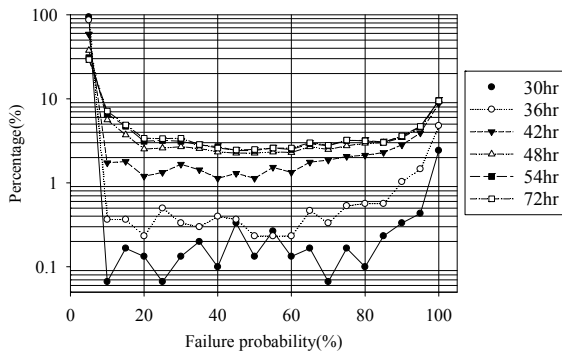


圖 11 不同時間之破壞機率
Fig. 11 Percentages of failure probability versus failure probability among different rainfall durations

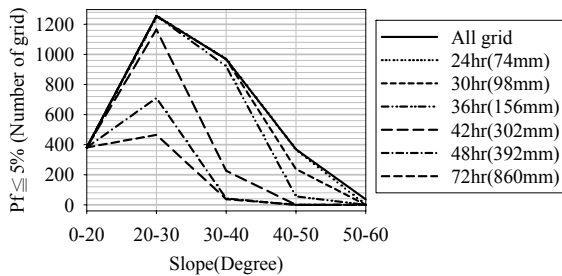


圖 12 破壞機率小於 5% 之網格數與坡度關係圖
Fig. 12 Number of grid points which the failure probability is less than 5% versus slopes

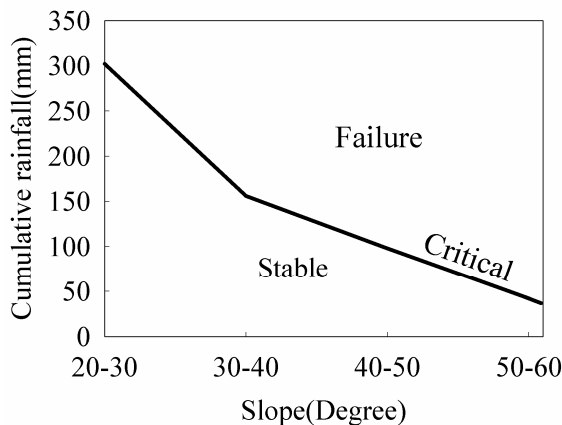


圖 13 奧萬大地區臨界累積降雨量與坡度之關係
Fig. 13 Relationship between the critical cumulative rainfall versus of slope in Aowanda

定的行為。由圖 3 與圖 11 可知，在降雨 24 小時之累積降雨量為 74mm 屬於零星降雨，未達中央氣象局定義的大雨 (heavy rain) 之標準，破壞機率 5% 以下高達 98.7%，破壞機率 95% 以上只有 0.46%。極可能為奧萬大地區風化板岩透水性佳且初始地下水位設置較低，邊坡受到的零星降雨影響有限。降雨 30 小時之累積降雨量增加到 98mm，破壞機率小於 5% 以下者，從原本的 98.7% 下降到 94.3%。而破壞機率 95% 以上增加到了 2%，顯示奧萬大地區的邊坡受到 98mm 雨量的影響下，穩定性開始產生較為明顯的變動。降雨 42 小時之累積降雨量，從圖 3 降雨組體圖可知，累積降雨達到 302mm，破壞機率變動幅度也最為劇烈 (圖 10 與 11)，破壞機率 5% 以下的區域從原本的 86.7% 大幅降到 58%，而破壞機率 95% 以上的區域也從 4.7% 增加到 8.7%，這表示降雨強度愈強破壞機率上升的速度也會加快。降雨 48 小時之累積降雨量上升到 392mm，奧萬大破壞機率小於 5% 之區域減少到 37%，而破壞機率 95% 以上卻只增加 1%。觀察圖 11，破壞機率 95% 以上在在雨量持續增加到 72 小時改變幅度並不明顯，這個結果與實際情況相當符合。在降雨後實際發生淺層崩塌之區域，其降雨量與崩塌面積並非成正比。降雨 72 小時之累積降雨量從 392mm 大幅增加到 818mm，足足增加了 426mm，但整體破壞機率的變化幅度並不如 36 到 42 小時之變化幅度。主要是因為 TRIGRS 程式只考慮降雨入滲後，地而下孔隙水壓上升的範圍有限，若達到飽和，最終破壞機率將成定值不再變化，但並不表示邊坡表面並無逕流與土壤沖蝕等影響。值得注意的是，由於本研究於採用 Rosenblueth 點估法，僅考慮凝聚力與摩擦角兩個主要變數之變異性進行研究，累積降雨量之結論較偏重於山崩發生位置之研究，而未考量水力參數變異性對降雨誘發山崩發生關聯性之影響。

2. 坡度與累積降雨量

利用 TRIGRS 模擬 24 小時、30 小時、42 小時與 72 小時的降雨產生的破壞機率在 5% 以下的網格數與坡度 20-30、30-40、40-50 與 50-60 度作比較，即可探討奧萬大地區受到累積降雨量入滲後，邊坡坡度之影響性。

由圖 12 所示，坡度 50-60 度的網格數共有 38 個網格數，模擬時間未達 24 小時破壞機率已全大於破壞機率 5%，顯示出奧萬大地區坡度最為陡峭之邊坡受到降雨誘發之下穩定性下降速度最快，但也有可能是

設置地層強度時凝聚力和摩擦角未考慮坡度之影響關係。坡度 40-50 度總共有 365 個網格數，在降雨時間 30 小時後剩下 237 個網格數，降雨時間 42 小時後破壞機率全都超過破壞機率 5%，顯示 30 小時的降雨量對邊坡穩定性影響不大。坡度 30-40 度的網格數共有 967 個，可以很明顯的看出變化幅度最大之雨量發生在 36 小時到 42 小時之間，網格數從 920 個降到 226 個相差了 694 個，但在坡度 20-30 度降幅只有 90 個網格數，這個結果與實際情況相符合，顯示出坡度愈緩愈能忍受高強度的降雨，反之坡度愈陡愈容易受到降雨強度的破壞。坡度 20-30 度總共有 1255 個網格數占總面積的 41.6%，網格數量變化最大的雨量發生在降雨時間為 42 小時到 48 小時之間，網格數從 1165 降成 710 個。以圖 10 與 11 對照來看，增加的破壞機率比率大多在破壞機率 50% 以下，顯示在奧萬大的邊坡 20-30 度的坡度受到降雨的影響有限。

圖 13 所示為邊坡不穩定時累積降雨量與坡度之關係，此圖可以定出邊坡坡度之累積降雨量的安全臨界線。邊坡坡度與降雨量若在臨界線以下，表示邊坡屬於穩定的狀態，若在臨界線之上，邊坡將有破壞的危險。

3. 定量指數與 ROC 曲線

由於 TRIGRS 程式使用無限邊坡理論，適用於預測淺層崩塌之初始位置，若崩塌類型為土石流或複合型崩塌，可能會產生較大之誤差。又因奧萬大區域各崩塌之確切發生時間無法得知，因此本研究以模擬辛樂克颱風整場降雨 72 小時後為主，以破壞機率 60% 的模擬結果之正確率與錯誤率進行定量指數探討與驗證。賴韋廷 (2009) 指出大型崩塌地與一般崩塌地應分開討論較為合理，又辛樂克颱風後奧萬大地區的崩塌地大多分佈在河道與道路兩側，因此本研究之定量指數主要探討道路兩側 50m、河道兩側 100m 與奧萬大聯絡道 0+8.6k 之大崩塌地，定量指數計算結果如圖 14。

定量結果顯示河道兩側的崩塌地的預測結果最好，成功指數 (SI) 為 79.4%，主要原因可能為河道兩側的邊坡崩塌區域長期受到河道冲刷下切的影響，坡度變為陡峭，在降雨誘發的影響下容易發生崩塌。由於地形符合無限邊坡的條件，TRIGRS 之模擬較準確。但也因地形陡峭的關係，與衛星影像判釋崩塌地時無法將河道沖蝕與崩塌正確的區分，在圈劃崩塌地時容易產生誤判，因此錯誤指數 (EI) 也達到 38.9%。

其次道路兩側 50m 的崩塌地預測成果相當的成功，SI 達到了 73.3%，且 EI 只有 20.3%。顯示奧萬大聯外道路之開挖對道路的上下邊坡穩定性影響很大，在高強度的降雨下，發生崩塌的機率明顯的提高。對於奧萬大聯外道路 0+8.6k 處的大崩塌地，TRIGRS 的穩定性模擬能力並不好，其 SI 和 EI 分別為 56.7% 和 51.1%。一般而言，在崩塌地的源頭區域穩定性模擬效果稱好 (圖 10)；而在崩塌地下方坡度較為平坦，較可能屬於土石堆積區，因此穩定性模擬的準確性較差。這顯示在無限邊坡的假設之下，TRIGRS 難以詮釋各種不同崩塌型態的崩塌地。

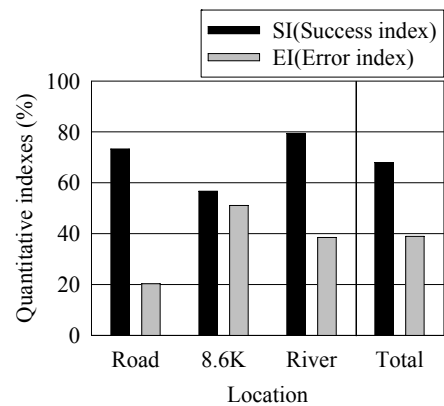


圖 14 定量指數分析結果 (道路兩側崩塌地、里程 8.6K 處崩塌地、河道兩側崩塌地和整個集水區)

Fig14 The quantitative indexes of the landslide areas (upslope and downslope of the road, Mileage 8.6K, both sides of the river, and the whole watershed area)

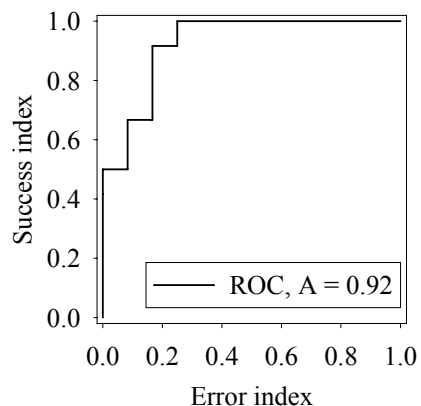


圖 15 奧萬大集水區 ROC 曲線圖

Fig.15 Results of receiver operating characteristic of Aowanda

圖 15 ROC 曲線係模擬 72 小時降雨後，以成功指數 SI 與錯誤指數 EI 所繪製而成，可據以判定分析模型的表現。圖 15 AUC 面積高達 92%，可知 TRIGRS 分析模型相當良好且適用於奧萬大區域。但值得注意的是，如圖 10，本研究 72 降雨模擬結果崩塌面積其實為超估，不過 AUC 值仍高達 92%，主要原因是所模擬超估崩塌面積所在，恰巧多落於實際崩塌地內，使得成功指數數值偏高，AUC 值也相對提高。

五、結論與建議

1. 結論

本研究應用 TRIGRS 程式進行奧萬大地區邊坡破壞機率模擬，以 72 小時模擬結果，利用定量指數將破壞機率大於 60% 來表示不穩定區域，與現地的崩塌地做比對，以無限邊坡理論模擬淺層崩塌之初始位置，進行探討道路和河道附近的崩塌情況，獲得幾點結論如下：

- (1) 使用地形指數解決土壤厚度與初始入滲率的參數不足的問題，並採用集水區分區與 Rosenblueth 點估法來克服地層強度參數之變異性，最後以 ROC 曲線與定量指數評估應用 TRIGRS 於奧萬大區域是適用的。
- (2) 奧萬大由於風化板岩透水性佳、水位較低，平常的零星降雨對邊坡穩定性影響有限。當累積雨量達到約 100 mm 時，邊坡穩定性開始產生明顯的變動，降雨強度愈強破壞機率上升的速度愈快。降雨量與崩塌面積之關係並非完全成正比關係。
- (3) 針對模擬降雨延時 24、30、42 與 72 小時之穩定性分析結果，將破壞機率在 5% 以下的網格數與坡度作比較，即可探討奧萬大地區邊坡坡度之影響性。坡度愈陡愈容易受到降雨的破壞，穩定性下降的速度愈快，反之坡度愈緩愈能承受高強度的降雨。
- (4) 本研究對奧萬大道路兩側的崩塌及河道兩側的崩塌預測能力都大於 70%，這些邊坡都符合 TRIGRS 之無限邊坡的假設。但河道兩側的崩塌的錯誤指數 (EI) 達到 38.9%，主要原因為在圈畫崩塌區位時，河道的崩塌地因河道沖蝕與崩塌，無法正確區分所產生的錯誤。在道路里程 0+8.6k 的崩場地並非屬無限邊坡，因此 TRIGRS 預測能力不佳。
- (5) 本研究之邊坡穩定分析尚不考慮不飽和區孔隙水壓分布之影響，但考慮了地表之降雨入滲後，孔隙水壓上升的影響。在地層達到飽和後，其破壞機率將成定值不再變化。不過此並不代表邊坡並不受地表逕流與土壤沖蝕等影響。

2. 建議

本研究網格採用 40 乘 40m，坡度有平緩均化之現象，導致本研究山崩潛感之結果為較安全，因此建議進行山崩潛感之研究可採用更高解析度之網格進行研究。

誌 謝

本研究承行政院國科會計畫 (NSC97-2313-B-005-042-MY3) 之部分支持，作者表達感謝之意。

參考文獻

1. 經濟部中央地質調查所，集水區地形及地質資料庫成果查詢系統，<http://gwh.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-2/sys9/>，參看日期：2011/05/09。(Central geological survey, MOEA, Inquiry system of watershed topographic and geological database, <http://gwh.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-2/sys9/>, Accessed on May. 09, 2011. (in Chinese))
2. 中興工程顧問公司 (2004)，「南投縣投 71 線道路卓社隧道東口至法治村路段復健工程簡易水土保持申報書」。(Sinotech Engineering Consultants, Ltd. (2004). *Simplified soil and water conservation plan for mitigation of Nantou County Road 71 between the east entrance of Zhou-She tunnel to Fa-Zhi village.* (in Chinese))
3. 王嫻兮 (2007) 應用 TRIGRS 「模式評估降雨及入滲誘發池上山棕寮地滑」，國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文。(Wang, P. H. (2007). *Using TRIGRS to assess the effects of rainfall and infiltration on landslide occurred at Shantsunliao*, ChihChang, Master thesis, National Chung Cheng University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
4. 朱聖心 (2001)，「應用地理資訊系統製作地震及

- 降雨所引致之山崩危險圖」，國立臺灣大學土木工程，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文。(Chu, S. S. (2001). *Seismic and rainfall landslide hazard maps with GIS*, Master thesis, National Taiwan University, R.O.C. (in Chinese))
5. 林衍丞 (2009)，「廣域山崩潛感分析模型力學-水力參數逆分析」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Lin, Y. C. (2009). *Prospects and limitations on determining the hydraulic-mechanical parameters in regional susceptibility model using back analysis technique*, Master thesis, National Central University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 6. 吳佳郡 (2006)，降雨誘發山崩之潛感分析初探，國立暨南大學土木工程學系碩士論文。(Wu, C. C. (2006). *Preliminary Study of Rainfall-Induce Landslide Susceptibility Analysis*, Master thesis, National Chi Nan University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 7. 林務局南投林區管理處 (2010)，「99 年度奧萬大聯外道路沿線安全檢測技術服務期末報告書」。(Nantou Forest District Office (2010). *Final report of the 2010 safety examination along the connection route of Aowanda*. (in Chinese))
 8. 鍾欣翰 (2008)，「考慮水文模式的地形穩定分析以匹亞溪集水區為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Chung, H. H. (2008). *Terrain stability analysis using hydrologic model for predicting shallow landslides—A study on Piya creek watershed*, Master thesis, National Central University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 9. 賴韋廷 (2009)，「利用不同崩塌地分類法改進崩塌潛勢之研究-以德基水庫集水區為例」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。(Lai, W. T. (2009). *Using different classification of landslide to improve research of landslide susceptibility—A case study of techi reservoir watershed*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 10. 蘇歆婷 (2007)，「降雨引發坡地淺崩塌風險評估模式之建立與應用」，國立交通大學土木工程學系碩士論文。(Su, H. T. (2007). *Development and application of risk assessment model for rainfall-triggered shallow landslide*, Master thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, R.O.C. (in Chinese))
 11. Baum, R. L., Savage, W. Z. and Godt, J. W. (2008). *TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis*, Version 2.0, U.S., Geological Survey. (Open-File Report 2008-1159)
 12. Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology," *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), 43-69.
 13. Liu, C. N. and Wu, C. C. (2008). "Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach," *Environmental Geology*, 55(4), 907-915.
 14. Chen, C. Y., Chen, T. C., Yu, F. C. and Lin, S. C. (2005). "Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide," *Environmental Geology*, 48(4-5), 466-479.
 15. Chen, J. C., Jan, C. D. and Lee, M. H. (2007). "Probabilistic analysis of landslide potential of an inclined uniform soil layer of infinite length: theorem," *Environmental Geology*, 51(6), 1239-1248.
 16. Duncan, J. M. (2000) "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 26(4), 307-316.
 17. Husein Malkawi, A. I., Hassan, W. F. and Abdulla, F. A. (2000). "Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability," *Structural Safety*, 22(2), 161-187.
 18. Iverson, R. M. (2000). "Landslide triggering by rain infiltration," *Water Resources Research*, 22(7), 1897-1910.
 19. 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.
 20. Lee, C. T., Huang, C. C., Lee, J. F., Pan, K. L., Lin, M. L. and Dong, J. J. (2008). "Statistical approach to storm event-induced landslide susceptibility," *Natural Hazard and Earth*

- System Sciences*, 8(4), 941-960.
21. Rosenblueth, E. (1975). "Point estimates for probability moments," *Proceedings of the national academy of science, mathematics*, 72(10), 3812-3814.
22. Sorbino, G., Sica, C., Cascini, L. and Cuomo, S. (2007). "Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models," *Natural Hazards*, 55(4), 907-915.
23. Cho, S. E. (2010). "Probabilistic Assessment of Slope Stability That Considers the Spatial Variability of Soil Properties," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(7), 975-984.
24. Swets, J. A.(1961). "Is there a sensory threshold?," *Science, New Series*, 134(3473), 168-177.
-

2011年05月10日 收稿

2011年06月09日 修正

2011年06月16日 接受

(本文開放討論至2012年3月31日)