

不同地形下植生特性對於淺層崩塌發生之影響

楊建宏⁽¹⁾ 宋國彰⁽²⁾ 許愷岐⁽¹⁾ 張勵婉⁽⁴⁾

摘 要

植被覆蓋可以降低淺層崩塌發生的機率，然而過去研究重點多集中在植物對於坡面穩定的淨效益，而未針對各別植生特性對於崩塌發生的影響力進行探討，此外在不同地形下這些植生特性對於坡面穩定的效力也可能有所變化。本研究探討的問題有兩個：(1)哪項植生特性對於淺層崩塌發生的影響力最顯著；(2)在不同地形中，這些有影響力的植生特性是否會有所變化。本研究地點位於臺灣南投縣蓮華池森林動態樣區(面積為 25 ha)，該樣區在 2008 年完成每木調查，紀錄所有胸高直徑(DBH)大於 1 cm 的木本植物，後於同年遭卡玫基及辛克樂颱風侵襲引發 11 處的崩塌(總計 0.9159 ha)。本研究利用崩塌前木本植物的 DBH 代入已發表公式來推算植株密度、樹高、樹冠幅面積、基徑、根冠面積及植物生物量等六項植生特性，並搭配坡度、凸起度及是否有溪溝經過三項地形水文因子，以邏輯斯迴歸來比較各項植生特性在全樣區、凸地(凸起度>5 m)、坡面(-5 m≤凸起度≤5 m)及凹地(凸起度<-5 m)的影響力。結果顯示，在全樣區中基徑為最有影響力的植生特性，其次是根冠面積。依不同地形類別來看，在凸地所有的植生特性都不具有影響力，而坡面則以根冠面積具有影響力，凹地有影響力者為樹冠幅面積及基徑。根據研究結果建議未來在進行崩塌地植生復育時，所選擇的木本植物種類應具備大的基徑、根冠面積及小的樹冠幅之特性。

(**關鍵詞**：邏輯斯迴歸、崩塌前植生特性、植生復育、潛層崩塌)

The influence of pre-landslide vegetation properties on shallow landslides in different topography

Yang, Jian-Hong⁽¹⁾, Guo-Zhang M. Song⁽²⁾, Kai-Chi Hsu⁽¹⁾, Li-Wan Chang⁽⁴⁾

⁽¹⁾PhD student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

⁽²⁾Assistant professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

⁽³⁾Assistant Researcher, Botanical Garden Division, Taiwan Forestry Research Institute, Taiwan

⁽⁴⁾Associate Researcher & Chief, Forest Protection Division, Taiwan Forestry Research Institute, Taiwan²

⁽¹⁾國立中興大學水土保持學系 博士生(*通訊作者 e-mail: jhyang@tfri.gov.tw)

⁽²⁾國立中興大學水土保持學系 副教授

⁽³⁾行政院農業委員會林業試驗所植物園組 助理研究員

⁽⁴⁾行政院農業委員會林業試驗所森林保護組 副研究員兼組長

ABSTRACT

Vegetation can reduce the incidence of shallow landslides. Past studies mainly focused on the net effects of vegetation rather than effects of vegetation properties on slope stability. This study attempted to tackle the two following questions: (1) Which vegetation property is most influential to slope stability; (2) Does the influential extent of vegetation properties change with topography (i.e. convex slopes, straight slopes, concave slopes). The study site was located in Lienhuachih Forest Dynamics Plot (the area is 25 ha), Nantou, Taiwan. Every tree with diameter of breast height (DBH) larger than or equal to 1 cm was recorded. Eleven landslides (the total area was 0.9159 ha) were triggered by Typhoons Kalmaegi and Sinlaku in the same year. Total of three topographic hydrological variables (i.e. slope, convexity and creek passing) and six vegetation variables (i.e. tree density, tree height (TH), tree crown area (TCA), the girth of tree base (GTB), root crown area (RCA) and tree biomass (TB)) were used to calculate the probability of landslide occurrence. TH, TCA, GTB, RCA and TB were calculated with DBH data from tree census according to the formula that had been published. Logistic regression was used to explore the influences of vegetation properties on landslide occurrence at the whole plot, convex slopes (convexity > 5 m), straight slopes (-5 m < convexity < 5 m) and concave slopes (convexity < -5 m). The results showed that GTB was the most influential vegetation property on the whole plot, followed by RCA. All vegetation properties were not significant on convex slopes. RCA was the most influential properties on straight slopes, and TCA and GTB on concave slopes. For landslide remediation, we suggested that the woody species with large GTB and RCA, and small TCA should be used.

(Keywords : Logistic regression, Pre-landslide vegetation properties, Recovery of vegetation, Shallow landslides)

前言

降雨所引發的淺層崩塌對於環境、經濟及社會都會造成相當大的影響(Nadim et al., 2006)，短期會影響水質及土壤生產力，甚至造成生命危險(Hamilton, 2008)；長期來看則能夠改變地形、影響土壤資源的可利用性(Sidle & Ochiai, 2006)。誘發淺層崩塌發生的

因子眾多，其中又以地形因子中的坡度及凸起度對淺層崩塌的影響力最大。一般來說，坡度越陡則崩塌發生機率越大(Genet et al., 2010)，而當坡度到達 30 度以後發生機率則會大幅地增加(Iwahashi et al., 2012)。凸起度方面，崩塌發生於凹地的機率是高於凸地的，這是因為地表的凹凸程度是左右水分留存程度的主因(Iwahashi et al., 2012)。除此之外，水流也是影響坡面穩定性的重要因子，在有

楊建宏、宋國彰、許愷岐、張勵婉：
不同地形下植生特性對於淺層崩塌發生之影響

水流經過的地方坡面會更容易發生崩塌 (Cruden, 1991)。在臺灣地區，根據詹勳全等 (2015) 的研究結果顯示，潛層崩塌主要是發生在坡度小於 50° 的東南至西向坡上。

過去已有許多研究都指出如果坡面上有植群存在，坡面安全係數大約能夠增加 20-30% (Fan & Lai, 2014; Ji et al., 2012; Kokutse et al., 2006; Mao et al., 2014)，這是因為植生的水文及機械作用改變坡面性質的緣故 (Greenway, 1987)。不同的植生特性對於坡面穩定性的影響也有所差異，一般常被探討的植生特性有植株密度、樹高、樹冠幅面積、基徑、根系加勁力及植物生物量。森林的植株密度越高則坡面穩定性越高 (Fan & Lai, 2014; Genet et al., 2010)，這是因為越高的植株密度，意味著地底下的根系密度也越高，同時林間孔隙也會越小 (Genet et al., 2010, 2008)；風力可以透過樹冠及樹幹傳到地面 (Coder, 2010)，進而降低坡面穩定性 (Coppin & Richards, 2007)。所以當森林樹高越高，樹冠垂直截面積越大，風力透過林木傳導後對於坡面的影響力也會越大。樹冠大約可以截留總降雨量的 15-35% (Taniguchi et al., 1996)，若落到地面的降水量減少時，土壤孔隙水壓上升速度也會減緩，所以樹冠幅面積增加是有助於減

緩崩塌發生的 (Mao et al., 2014)；降雨時雨水會隨著樹幹流入土壤，快速增加土壤水含量，此現象稱為樹幹流。樹幹流雖然占總降雨量的比例不高，卻提供了 10-20% 的土壤水含量 (Tanaka et al., 1996; Taniguchi et al., 1996)。而基徑越大，沿樹幹流入土壤中的雨水越多 (Tanaka et al., 1996)，崩塌發生機會就越大 (Stokes et al., 2009)；土壤滑動會使根系受到拉伸或壓縮，在根系發生形變時將會提供土壤根力來增加坡面的抗剪強度 (Cohen & Schwarz, 2017)。影響根系加勁力的根系特徵有很多，如根系密度、根徑粗細、根系深度等等。整體來說，根系密度越高、根徑直徑越粗、根系深度越深，根系所能提供越多的加勁力給周圍土壤 (Genet et al., 2010, 2008; Ji et al., 2012; Stokes et al., 2009)；最後是植物生物量的部分，此項植生特性對坡面安全係數的影響是取決於樹木生長的位置。根據 Genet et al., (2010) 的模擬結果，當樹木只生長於坡腳時整體坡面安全係數可以增加 10.2%，但若樹木只生長於坡頂，坡面安全係數反而會較裸露坡面減少 41.7%。

整體而言，雖然植被有助於減緩淺層崩塌的發生 (Stokes et al., 2009)，但各項植生特性對於坡面安全係數的影響是不一致的。上

述研究大多僅僅探討其中一到二項的植生特性，幾乎沒有研究是針對多項植生特性交互作用後對於坡面穩定性的影響進行探討。除此之外，過去研究已指出生物量在上坡和下坡的作用是有不同的(Genet et al., 2010)，這種於不同坡面位置影響力有所差異的情形也可能會出現在其它植生特性中。藉由瞭解植生特性在不同坡面位置對於穩定性的影響，將有助於未來植生工程於坡面治理的應用。

過去大多數針對崩塌的研究多會使用 NDVI 或植生覆蓋率等(如林昭遠、藍欣茹，2015；陳樹群等，2012)來作為植生特性進行分析，此些指標雖然可以大面積地快速蒐集，但卻難以反應各別的植生特性，然而若要完整收集所有植生現地資料往往需要耗費巨大的成本。所幸大多數的植生特性都與胸高直徑(diameter at breast height, DBH)有著高度相關性，因此可以利用 DBH 推估獲得。臺灣南投的蓮華池森林動態樣區於 2008 年完成每木調查，同年遭到卡玫基及辛克勒颱風侵襲於樣區內發生了 11 處的崩塌。本研究將利用此次崩塌前所調查完成的植生資料及崩塌位置，來探討以下兩個問題：(1)對於淺層崩塌的發生，哪項植生特性的影響力最大？(2)當地地形凸起度有所不相同時，各項植生特性對

於淺層崩塌發生的影響力會不會因此而改變？

研究方法

1.研究地點

本研究地點位於臺灣南投縣魚池鄉的蓮華池森林動態樣區(Lienhuachih forest dynamics plot)(N23°54'49", E120°52'43")，此森林動態樣區是依據依美國史密斯熱帶研究所熱帶森林科學研究中心(the Center for Tropical Forest Science, Smithsonian Tropical Research Institute, USA)制定的規範，於 2008 年建立的長期研究樣區。樣區設立是利用經緯儀每隔 20 m 水平距離標定一個基準點，並記錄該點之海拔高。每四個基準點所圍成的 20 m × 20 m 的區域會被稱為樣方(quadrat)，是執行森林動態樣區調查時一個標準且獨立的調查範圍，故為森林動態樣區的基本單元(如圖 1 框線所示)。蓮華池森林動態樣區共有 625 個樣方，面積總計 25 ha(500 m × 500 m)。在樣區設置完成後會對區域內所有 DBH 大於 1 cm 的木本植物進行調查，記錄其物種、所在位置及 DBH。根據樣區基準點資料得知此樣區海拔介於 667 m 至 845 m 之間，平均坡度 36°，最陡坡達 77°(圖 1a)。此次調查共

楊建宏、宋國彰、許愷岐、張勵婉：
不同地形下植生特性對於淺層崩塌發生之影響

紀錄了 153,261 株林木，分屬有 46 科 144 種，其中以殼斗科(Fagaceae)最為優勢，其次為樟科(Lauraceae)及茜草科(Rubiaceae)(張勵婉等，2012)。氣候部分，該區年均溫 20.4°C，1 月均溫為 14.4°C，7 月均溫為 24.5°C；年降雨量為 2,439 mm，主要集中於 5 至 9 月間(圖 2)。2008 年每木調查結束後，臺灣遭受颱風

卡玫基及辛克樂的侵襲。這兩場颱風在南投縣分別於兩日內降下 556.5 mm 及 800.0 mm 的雨量(日月潭氣象站，N23°54'29"，E120°53'00")。並於樣區內引發了 11 處崩塌，總面積計 9,159.47 m²。當中最大者達 2,561.62 m²，最小僅有 83.85 m²(張勵婉等，2017)(圖 1c)。

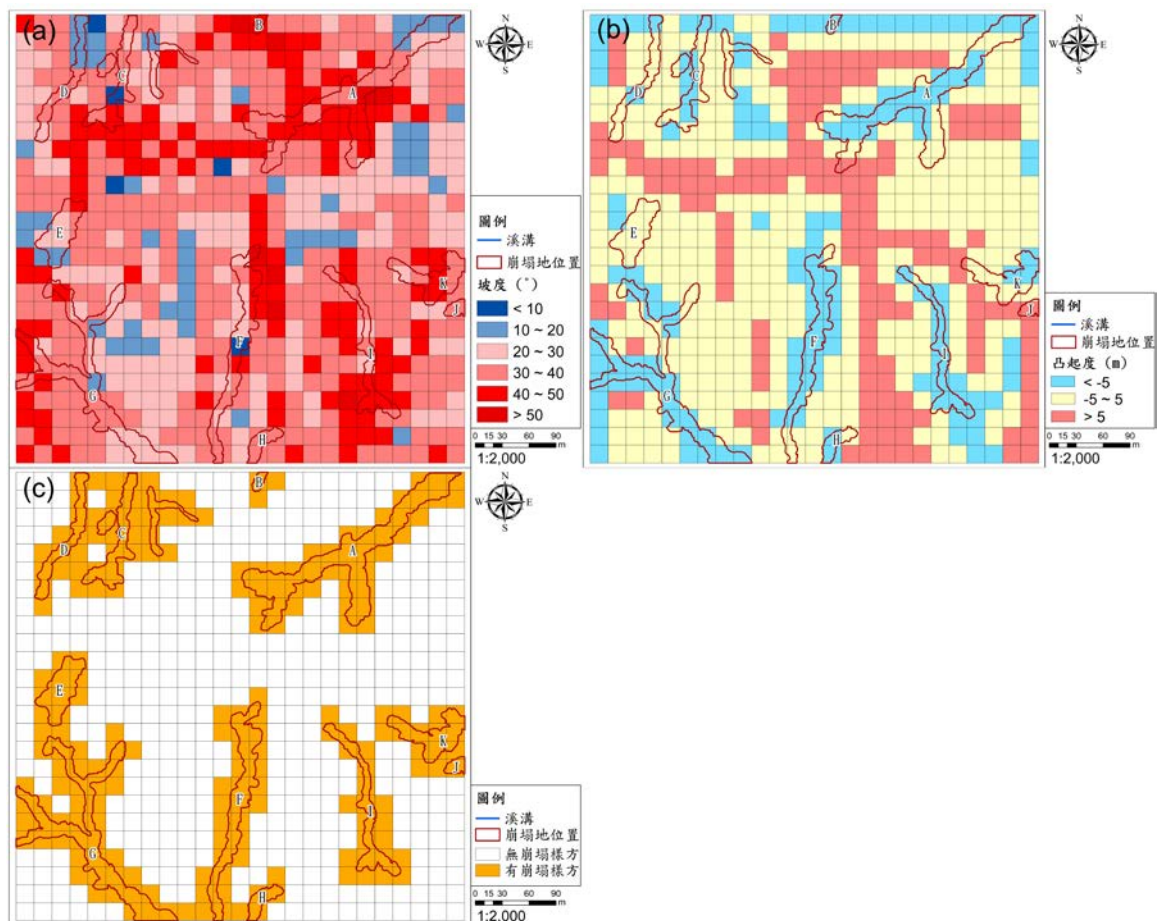


圖 1 蓮華池森林動態樣區之(a)坡度地形圖、(b)凸起度及(c)崩塌樣方分布圖。圖中每個網格為 20 m × 20 m 的樣方。

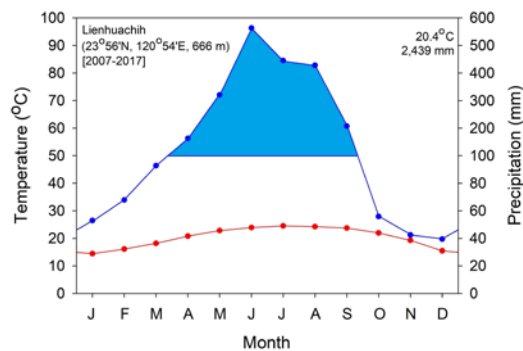


圖 2 蓮華池森林動態樣區之生態氣候圖。圖中雨量曲線高於溫度曲線之月份為相對潮濕期 (relative humid)，藍色月份為極濕期 (perhumid)。

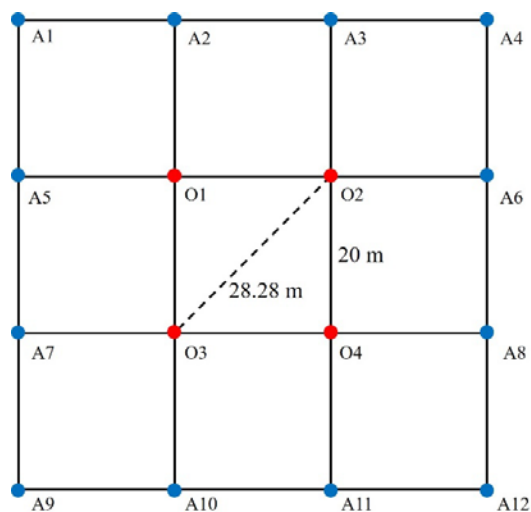


圖 3 本研究計算坡度及凸起度之示意圖。圖中 O1-O4 四個基準點所圍之樣方為欲計算坡度及凸起度之目標樣方，A1-A12 周圍八個樣方之基準點。

2. 分析方法

(1) 分析變數

本研究將以樣方為分析單元，計算每個樣方的坡度、凸起度、是否有溪溝經過、植株密度、樹高、樹冠幅面積、基徑、根冠面積及木本植物生物量。並套疊卡孜基及辛克樂颱風所造成的崩塌位置圖，將所有樣方區分為無崩塌樣方及有崩塌樣方(圖 1c)。藉由上述於崩塌前所調查到的地形、水文及植生資料作為分析變數來評估植生特性對於崩塌的影響力，其中坡度及凸起度會利用樣區內基準點所紀錄的海拔高來進行計算。坡度方面，計算方法為目標樣方周圍四個基準點(O1-O4)中海拔最高者扣除最低者算出高程差，再以底邊(20 m 或 28.28 m)計算求得。例如樣方(0,0)最高標竿 SW 為 803.68 m；最高標竿 NE 為 777.90 m，高程差為 25.78 m，底邊為 28.28m，故坡度為 42.31° ；凸起度則是以目標樣方周圍八個鄰近樣方外圍的十二個基準點(A1-A12)平均海拔高扣除目標樣方四個基準點(O1-O4)的平均海拔高(圖 3)。是否有溪溝經過的判定則使用 ArcGIS10.2 進行套疊，來選取出所有有溪溝流經的樣方。

用於分析之植生特性包含了植株密度、

樹高、樹冠幅面積、基徑、根冠面積及木本植物生物量。其中植生密度指單位面積內的植株數量；樹高指樹梢頂端至地面的垂直距離；樹冠幅面積指樹冠枝葉所涵蓋的投影面積；基徑為樹木與地面交接處樹幹的直徑；根冠面積為樹木根系所涵蓋的範圍；而木本植物生物量是指樹木地上部及地下部重量的總合。大多數的植生特性(除植株密度外)都與 DBH 有著高度相關性，所以即使當年未對每株林木的樹高、樹冠幅面積、基徑、根冠面積及木本植物生物量進行現場測量，亦可經由過去研究結果的迴歸式來進行估算。雖然在蓮華池地區尚未有研究完整建立各項植生特性與 DBH 間的推估公式，所幸除基徑外均有前人進行過相關的研究。故除植株密度及基徑外，本研究分析使用的植生特性均會參酌過去研究結果，以作為崩塌發生影響之推估使用。植株密度因 2008 年每木調查有紀錄每株林木之座標及所屬樣方，因此可以直接從調查結果得知。惟基徑與 DBH 的相關性過去並未有相關學者進行過探討，為獲得此項植生特性本研究假設林木為均勻之圓錐體，如此一

表 1 本研究植生特性代號、計算公式及參考文獻。

植生特性	代號	公式	參考文獻
胸高直徑	D	現場測量	-
植株密度	WD	以每木調查結果計算	-
樹高	H	$H = 1.3 + \frac{31.3194}{[1 + 1/0.0328D^{1.2487}]}$	(Huang et al., 1992)
樹冠幅面積	CA	$CA = ((15.233D + 1.1331)/2)^2\pi$	(Hemery et al., 2005)
基徑	GTB	$GTB = D \times \left(\frac{H}{H - 1.3}\right)$	-
根冠面積	RCA	$RCA = \left(\frac{5.8 \times D^{1.05}}{100}\right)^2 \pi$	(Roering et al., 2003)
地下部生物量	RB	$\log RB = \log 0.031 + 2.38 \log D$	(Lai et al., 2013)
地上部生物量	AGB	$AGB = \exp(-2.977 + \ln(\rho D^2 H)) \equiv 0.0509(\rho D^2 H)$	(Chave et al., 2005)
木本植物生物量	TB	$TB = \frac{(RB + AGB)}{1000}$	-

來兩者間便會呈比例關係。經幾何計算後即可得知，基徑與胸高直徑比等於樹高與樹高扣 1.3 m，藉此將可推算出每株林木之基徑。本研究所有使用的植生特性之推估公式與引用文獻皆列於表 1 中，而木材密度則以 0.68 g/cm³ (Slik et al., 2008)作為參考。

(2)分析方法

為先瞭解無崩塌及有崩塌樣方間各項變數是否有差異，會先使用獨立樣本 T 檢定 (Independent sample t test)來進行比較，並挑出顯著性小於 0.05 的變數來進行下一步分析。又為探討不同凸起度對崩塌發生有影響力的植生特性是否有所差異，將會依地形區分出四個類別來進行分析，分別是全樣區、凸地(如山頭、稜線等)、坡面及凹地(如山谷、溪溝等)。當全樣區是指蓮華池森林動態樣區內所有樣方，不以凸起度加以區分。而凸地則定義為凸起度大於 5 m 的樣方；坡面則為凸起度介於-5 m 到 5 m 內的樣方；凹地則為凸起度小於-5 m 的樣方(圖 1b)。下一步將使用邏輯斯迴歸(Logistic regression)來作為各項變數對於崩塌發生影響力的評估工具。邏輯斯迴歸除了經常被用於進行風險的評估外，也可計算出每一項變數上升時事件(即崩塌)

所增加的風險程度(Kleinbaum, 2010)。其公式為：

$$\hat{P}(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum \beta_i X_i)}}$$

式中 $\hat{P}(x)$ 為事件發生機率； α 為背景機率(background)； β_i 為當變數 X_i 上升一單位時，事件發生的風險增加程度。利用式中之 β 值即可評估每項變數對於崩塌發生的影響力，當 β 值越大則代表變數影響力越大。而當 β 值為負時則代表會降低崩塌發生的機率，當為正值時則表示該變數會增加崩塌發生的風險。最後，為挑選出真正有影響力之變數，將會使用向後選取法(stepwise backward variable selection)來排除顯著性大於 0.1 的變數。前述分析會使用 SPSS19 來進行。

經由 ROC(receiver operating curve)計算出的 AUC(area under curve)可作為評斷該模型優劣的標準，有助於瞭解經邏輯斯迴歸所產生模型是否有判別力。當 AUC 為 0.0-0.5 時，則此模型的判別結果幾乎是錯的(negative discrimination)；當 AUC 為 0.5 時，代表沒有判別力(no discrimination)；當 AUC 為 0.5-0.6 間時，則指判別力不佳(failed discrimination)；當 AUC 介於 0.6-0.7 間時，此模型判別力尚可(poor discrimination)；當

AUC 介於 0.7-0.8 間時，意指判別力不錯(fair discrimination)；當 AUC 為 0.8-0.9 時，為判別力良好(good discrimination)；當 AUC 為 0.9-1.0 之間時，代表模型擁有極好的判別力(excellent discrimination)(Kleinbaum, 2010)。

結果與討論

無崩塌樣方和有崩塌樣方的地形間是明顯不同的，前者大多位於凸地或坡面；而有崩塌樣方凸起度則為負值，意味凹地發生崩塌的比例是比較高的。坡度方面，雖然從平均值來看兩者差異並不大(僅相差 1.78°)，但統計結果卻有顯著差異(表 2)，表示有崩塌樣方明顯比較陡峭。崩塌發生前有無崩塌樣方的植生特性比較結果顯示，除了樹高以外，其它項植生特性在無崩塌樣方和有崩塌樣方間都有顯著差異(表 2)。植株密度、樹冠幅面積、基徑、根冠面積及木本植物生物量都是在無崩塌樣方比較高，由此可知有較多植物生長的樣方，其崩塌發生比例是相對低的。

除了在凸地外，其它三個類別(即全樣區、坡面、凹地)的 ROC 均介於 0.8 至 0.85，屬於所建立模型判別力良好(表 3)，代表本研究模擬分析之結果是足以相信的。就全樣區

來看「是否有溪溝經過」為左右崩塌發生最關鍵的因素，其影響力遠高於其它地形及植生特性。而凸起度的影響力又較坡度來得高，每當凸起度每增加 1 m 則崩塌發生機率會下降 0.079%，而坡度每增加 1° 則崩塌發生機率便會上升 0.046%。植生特性方面，只有基徑和根冠面積是有顯著性的，其它對於崩塌發生的機率並沒有顯著影響。兩者又以基徑的 β 值較高，並且夠降低崩塌發生的可能性(表 3)。

將凸起度的分類考慮進去後則有顯著性的變數便會有所不同。在凸地時，不管是何項地形及植生特性對於崩塌的發生都是沒有顯著性的，由此可知影響凸地崩塌發生的因子並未被本篇研究所掌握。在坡面及凹地中，「是否有溪溝經過」仍為最有影響力的因子，坡度於這兩個類別均會增加崩塌發生的可能性，反倒是在凹地時凸起度增加是會提升崩塌發生的機率，這和在全樣區及坡面中的表現是不一樣的(表 3)；有顯著性之植生特性在坡面及凹地是有所差異的。在坡面時僅有根冠面積會降低崩塌發生的機率，但此因子到了凹地便沒有顯著性。凹地有影響力的植生特性則為樹冠幅面積及基徑，其中前者會稍微增加崩塌發生的機率，但後者卻可以

表 2 無崩塌樣方及有崩塌樣方之地形及植生特性獨立樣本 T 檢定之結果。

	無崩塌樣方	有崩塌樣方	p-values
坡度 (°)	32.11	33.89	0.0165*
凸起度 (m)	1.75	-4.68	0.0001**
植株密度 (stems)	277.88	178.80	0.0001**
樹高 (m)	17.40	17.77	0.1195
樹冠幅面積 (m ²)	1,121.40	802.81	0.0001**
基徑 (cm)	1,588.90	1,108.90	0.0001**
根冠面積 (m ²)	262.74	196.21	0.0001**
木本植物生物量 (ton)	15.36	11.53	0.0001**

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

大幅地降低崩塌的發生(表 3)。就植生特性對於崩塌發生機率整體的表現來看，可以發現即使是相同的植生特性在不同的類別中也會有著不一樣的表現，即在某些類別下是有極強的影響力，但其它條件則是不顯著的。植株密度及木本植物生物量則是於任何狀況下都沒有顯著性。最後基徑只要有顯著性的情況下，就都是最有影響力的植生特性， β 值甚至高過凸起度及坡度，僅次於「是否有溪溝經過」(表 3)。

Iwahashi et al., (2012)指出坡度及凸起度是崩塌是否會發生的重要的因子，本研究結果也支持相關的看法。在四種類別中，除凸地外坡度及凸起度皆有顯著性及相當程度的影響力(表 3)。比較特別的是，在凹地中凸起

度增加反而會促使崩塌發生。這是因為被歸類於凹地的樣方都是位於蓮華池森林動態樣區的下坡或河谷處，所以凹地中凸起度高和低的區域分別是整個坡地的下坡處及河谷(圖 1b)。河谷本身就是比較不容易發生崩塌的位置，而下坡處則因為土壤水含量高屬於崩塌的好發地(Schwarz et al., 2010)。

本研究坡度及凸起度是利用現場量測之海拔高計算而成，雖以經緯儀測量精準度相當高，但在進行人為測量時或多或少會發生人為及系統性的誤差(林宏麟，1995)。而蓮華池森林動態樣區測繪是由樣區西南角開始進行，不可避免地離初始測量點越遠的基準點越容易會有誤差產生，進而影響到坡度及凸起度的計算結果。現今遙航測技術成熟，將來可改以高解析度光達資料來繪製 DEM，

進一步計算坡度、凸起度等地形因子，則可以有效避免測量上人為及系統的誤差。另一方面，分析時直接以溪溝是否經過作為變數進行，也確實證明了有河道經過的樣方其崩塌機率會大幅增加(表 3)。然而即使是沒有溪溝流經的區域也可能擁有高土壤含水率或於降雨時產生臨時的優勢流道(preferential flow paths)。地形溼度指數(topography wetness index, TWI)是利用坡度及上坡排水面積計算出來的水文指標，TWI 高的地區可以預期在降雨發生時該處會有比較多的水流通過(Sørensen & Seibert, 2007)。因此未來再進行相關研究可利用 TWI 作為變數，或許更能表現出水文對於崩塌發生的實際影響力。

在凸地、坡面及凹地有影響力的植生特性會不一樣，主要有兩個原因。首先是在不同地形類別下力學、機械、水文及土壤性質都不盡相同，使特定植生特性在特定狀況下可以發揮比較大的作用。例如植物根系在坡面上除了會提供周圍土壤根系加勁力外，也會在植株間產生拱壁效應(soil arching effect)，進而增加上坡沒有根系覆蓋區域的安全係數，且植株分布在越下坡處此效應越明顯(Fan & Lai, 2014)。因此在坡面植物根系的影響力會高於凹地，這可能是因為拱壁效應在凹地比

較明顯，促使在沒有根系分布的區域也能夠產生些許的穩固力，造成根系加勁力重要性下降的緣故(表 3)。此外，Genet et al., (2010)的模擬結果也顯示出相同的情形，即樹木生物量在上坡及下坡處對於坡面安全係數的影響是不相同的，雖然本研究在本本植物生物量上並未觀察到類似的情形；第二點是植物在生長上具有可塑性(Crispo, 2008)，當立地條件不同時便會發展出足以適應的策略或形態來，如此與土壤、水文等環境因子間的互動就會出現變化，進一步改變對坡面穩定性的影響。例如根系會受到土壤深度(Soethe et al., 2006)、營養及水分可利用性(Ji et al., 2012; Stokes et al., 2009)、在坡面位置(DiIorio et al., 2008)等影響，而樹冠面積則會受到物種組成、立地條件及經營策略影響(Jonckheere et al., 2004)。正如前述，凸地、坡面及凹地的各項立地條件在並不一致，所以植生特性也不會有相同的表現，像是蓮華池森林動態樣區中凹地的平均樹高會較凸地來得高，而基徑則是凸地比凹地還要大。

過去普遍認為根系是促進坡面穩定最重要的植生特性(Stokes et al., 2009)，但這與本研究結果有所出入。雖然根冠面積在全樣區及坡面上都有顯著性，但其影響力並不如

表 3 蓮華池森林動態樣區內(不以凸起度區分)及凸地(凸起度>5 m)、坡面(-5 m≤凸起度≤5 m)、凹地(凸起度<-5 m)各項因子邏輯斯迴歸之 β 值。

變數	類別			
	全樣區	凸地	坡面	凹地
AUC	0.851	0.500	0.799	0.850
是否有溪溝經過	2.378	No sig.	3.316	2.286
坡度	0.046	No sig.	0.062	0.068
凸起度	-0.079	No sig.	-0.202	0.103
植株密度	No sig.	No sig.	No sig.	No sig.
樹冠幅面積	No sig.	No sig.	No sig.	0.008
基徑	-0.087	No sig.	No sig.	-0.743
根冠面積	-0.003	No sig.	-0.007	No sig.
木本植物生物量	No sig.	No sig.	No sig.	No sig.

No sig.：沒有顯著性。

預期中的高(表 3)。這可能是因為根冠面積是利用國外公式進行推估，所以有嚴重低估的情形發生。根據 Vyskot (1976)的研究結果，林木之根冠面積應大約為樹冠投影面積的 60%左右，但樣方內的根冠面積大約只有樹冠幅面積的 23-24%左右(表 2)。造成這低估的原因，主要是因為 Roering et al. (2003)所建立 DBH 及樹冠半徑推估公式的樹種是美國西海岸俄勒岡海岸山脈的花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)。縱使分析前已有進行調整以讓推估公式更適用於臺灣地區，然而

蓮華池森林動態樣區多達 144 種木本植物，且大多為闊葉樹種(張勵婉等, 2012)，所以仍不可避免地會有誤差產生。過去普遍認為越大的基徑樹幹流的量越多(Taniguchi et al., 1996)，入滲後快速增加土壤水含量，因此是不利於坡面穩定的(Schwarz et al., 2010)。但本研究的結果卻顯示基徑越大崩塌發生機率越低(表 3)。這有兩個可能性，第一是基徑推算並不正確，因為其它所有的植生特性均是經前人研究所得，而只有基徑是利用假設林木為圓錐體來進行幾何計算推估的，所以可能基徑與 DBH 間的關係並非如此，導致推估

楊建宏、宋國彰、許愷岐、張勵婉：
不同地形下植生特性對於淺層崩塌發生之影響

出來的結果和現實狀況產生落差；亦有可能基徑除了會增加樹幹流量外，確實還存在著其它可以穩定坡面的作用存在，故需要針對基徑與坡面穩定性進行更進一步的研究。

有顯著性的植生特性除了基徑外，其於 β 值都較地形因子來得低，且許多植生特性是沒有顯著性的(表 3)。邏輯斯迴歸中 β 值是指該變數每上升一單位，事件發生增加的百分比數(Kleinbaum, 2010)。相較於地形因子，植生特性單位大多是較小的(如 m 或 m^2)。如果不看每增加一個單位的影響力而是以整體的影響力來評估的話，植生特性不見得會比地形因子來得低。以全樣區來說，無崩塌樣方及有崩塌樣方之根冠面積分別是 $262.74 m^2$ 及 $196.21 m^2$ ，相差 $66.53 m^2$ ；而凸起度則分別為 1.75 m 及 -4.68 m，相差僅 6.43 m(表 2)。再配合表 3 之 β 值，則根冠面積及凸起度的總影響力應分別為 0.1996 及 0.5080。凸起度的整體影響力約為根冠面積的 2.5 倍，比起原本兩項因子每單位的影響力相差約 29 倍縮小了許多。綜合上述，可以知道就地形因子每增加一個單位對於坡面穩定性的影響力絕對是遠大於植生特性的，但考量到總體影響力的話，植生特性對於坡面穩定也確實是不可忽視的力量。

整體來說，在全樣區中基徑是減緩崩塌發生最重要的植生特性，其次是根冠面積，且在不同的凸起度下有影響力的植生特性也有所不同(表 3)。然而為更準確地找出影響崩塌的關鍵植生特性，仍有幾點項目可以精進。首先，雖然本研究已經盡量引用與臺灣地區相近試驗地的推估公式，但仍與蓮華池森林動態樣區的現地情形會有所差距。因此未來建立蓮華池森林動態樣區 DBH 與其它各項植生特性間的推估公式將有助於避免此問題的發生；再來，需要找到適合臺灣山區進行崩塌地分析的網格尺度。本研究是以永久樣區的樣方作為分析網格，即為 $20 m \times 20 m$ 的矩形。在進行網格分析時，會因為每個地區的地形起伏程度及探討對象，而適用的網格大小會有所不同。例如在平坦地區適合較粗的網格尺度，而當地形崎嶇時則應用較細的網格來進行分析(Cavazzi et al., 2013)。所以 Claessens et al. (2005)曾指出，沒有最佳的網格可以來預測崩塌發生，只有最適合的網格大小；接著，需要更準確地切分所有橫跨兩個樣方以上的植生特性。例如大樹樹冠是有機會橫跨兩個以上的樣方，而實際的影響範圍也是會涉及所有覆蓋的區域。但在本研究是依該林木所在位置將所有樹冠幅面積視

為該樣方所有。如此一來臨近樣方內可會發生實際上有被樹冠影響，但卻無法反應在樣方的值上；最後，是有關有崩塌樣方的定義必需更加明確。在本研究中只要經過 GIS 疊圖後有與崩塌範圍相交即視為有發生崩塌的樣方，然而部分有崩塌樣方內實際崩塌的面積可能十分狹小。所以應該設定一個適當的門檻，來排除這些僅有一小部分崩塌的樣方。

結論

本研究結果顯示對於坡面穩定性而言植生特性確實有著相當重要的影響力，且會隨著所在位置不同而有所改變。在蓮華池森林動態樣區內基徑為最有影響力的植生特性，其次是根冠面積。若以不同地形類別來看的話，在凸地有影響力的植生特性本研究並未找到，而坡面則以根冠面積具有影響力，凹地有影響力者為樹冠幅面積及基徑。為了更準確地找出有影響力的植生特性，未來需要有幾點進行精進，分別為建立蓮華池森林動態樣區內 DBH 與其它植生特性之推估公式、找尋最佳預測網格尺度、更準確地切分跨樣方之植生特性及建立更有代表性的有崩塌樣方定義。

致謝

本論是科技部計畫(計畫編號 MOST 106-2625-M-005-009)的成果之一。感謝林業試驗所(計畫編號 97 AS-7.1.1.F1-G1)與林務局(計畫編號 TFBM-960226)對每木調查的支持。

參考文獻

1. 林宏麟(1995),「測量學(初版)」,台灣台南。
2. 林昭遠、藍欣茹(2015),「山區道路與小林村崩塌關係之探討」,水土保持學報, 47(1): 1287-1296。(Lin, C. Y., and Lan, H.J. (2015). "A study of the relationship between the road development and landslide in Xiaolin Village." Journal of Soil and Water Conservation, 47 (1): 1287–1296. (in Chinese))
3. 陳樹群、吳俊毅、謝政道(2012),「崩塌危害分析模型之建立—以臺北水源特定區為例」,中華水土保持學報, 43(4): 332-345。(Chen, S.C., Wu, Y.W., and Hsieh, C.D. (2012). "The establishment of

- a landslide Hazard Analysis Model for the Taipei Water Source Domain.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(4): 332-345. (in Chinese))
4. 張勵婉、黃正良、陳意婷、葉秋好、林奐慶、郭智筌、林佳佳、孫義方、楊國禎、陳尊賢、王相華(2012),「蓮華池亞熱帶常綠闊葉森林動態樣區樹種特徵及其分布模式」,林業試驗所,台灣台北。(Chang L.W., Hwong, J.L., Chen, Y.T., Yeh, C.Y., Lin, H.C., Kuo, C.C., Lin, C.C., Sun, I.F., Yang, K.C., Chen, Z.S., and Wang, H.H. (2012). “Lienhuachih Subtropical Evergreen Broadleaf Forest Dynamics Plot: tree species characteristics and distribution patterns.” *Taiwan Forestry Research Institute, Taipei, Taiwan.* (in Chinese))
 5. 張勵婉、陳意婷、黃正良(2017),「颱風擾動後台灣中部蓮華池森林動態樣區木本植物的傷害及更新」,台灣林業科學, 32(1): 1-14。(Chang, L.W., Chen, W.T., and Hwong, J.L. (2017), “Damage and regeneration of trees in Liehuachih Forest Dynamics Plot in central Taiwan after typhoons disturbance”. *Taiwan Journal of Forest Science*, 32(1):1-14) (in Chinese))
 6. 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生(2015)「台灣山區淺層崩塌地特性調查與分析」,中華水土保持學報, 46(1): 19-28。(Chan, H.C., Chang, C.C., Chen, S.C., Wei, Y.S., Wang, Z.B., and Lee T.S. (2015). “Investigation and analysis of the characteristics of shallow landslide in mountains area of Taiwan.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 46(1): 19-28. (in Chinese))
 7. Cavazzi, S., R. Corstanje, T. Mayr, J. Hannam and R. Fealy (2013), “Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping?,” *Geoderma*, 195: 111–121.
 8. Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M.A. Cairns, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.P. Lescure, B.W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra and T. Yamakura (2005), “Tree allometry and improved estimation

- of carbon stocks and balance in tropical forests,” *Oecologia*, 145(1): 87–99.
9. Claessens, L., G.B.M. Heuvelink, J.M. Schoorl and A. Veldkamp (2005), “DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling,” *Earth Surf. Process. Landforms*, 30: 461–477.
10. Coder, K.D.(2010), “Root strength & tree anchorage,” Warnell School of Forestry & Natural Resources, University of Georgia, Athens, Georgia, USA.
11. Cohen, D. and M. Schwarz (2017), “Tree-roots control of shallow landslides,” *Earth Surf. Dyn. Discuss.*, 5: 451–477.
12. Coppin, N.J. and I.G. Richards (2007), “Use of vegetation in civil engineering,” Ciria, London, UK.
13. Crispo, E. (2008), “Modifying effects of phenotypic plasticity on interactions among natural selection, adaptation and gene flow,” *J. Evol. Biol.*, 21(6): 1460–1469.
14. Cruden, D.M. (1991), “A simple definition of a landslide. Bull,” *Int. Assoc. Eng. Geol.*, 43(1): 289–304.
15. DiIorio, A., B. Lasserre, L. Petrozzi, G.S. Scippa and D. Chiatante (2008), “Adaptive longitudinal growth of first-order lateral roots of a woody species (*Spartium junceum*) to slope and different soil conditions-upward growth of surface roots,” *Environ. Exp. Bot.*, 63: 207–215.
16. Fan, C.-C. and Y.-F. Lai (2014), “Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes,” *Plant Soil*, 377: 83–95.
17. Genet, M., N. Kokutse, A. Stokes, T. Fourcaud, X. Cai, J. Ji and S. Mickovski (2008), “Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability,” *For. Ecol. Manage.*, 256(8): 1517–1526.
18. Genet, M., A. Stokes, T. Fourcaud and J.E. Norris (2010), “The influence of plant diversity on slope stability in a moist

- evergreen deciduous forest,” *Ecol. Eng.* 36(3): 265–275.
19. Greenway DR. (1987) “Vegetation and slope stability. In *Slope Stability*, Anderson MG, Richards KS (eds),” John Wiley & Sons, Chichester, UK.
20. Hamilton, L. (2008), “Forests and water: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005,” FAO, United Nations.
21. Hemery, G.E., P.S. Savill and S.N. Pryor (2005), “Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees,” *For. Ecol. Manage.*, 215: 285–294.
22. Huang, S., S.J. Trtus and D.P. Wiens (1992), “Comparison of nonlinear height–diameter functions for major Alberta tree species,” *Can. J. For. Res.* 22(9): 1297–1304.
23. Iwahashi, J., I. Kaniya and H. Yamagish (2012), “High-resolution DEMs in the study of rainfall- and earthquake-induced landslides : Use of a variable window size method in digital terrain analysis,” *Geomorphology*, 153–154: 29–38.
24. Ji, J., N. Kokutse, M. Genet, T. Fourcaud and Z. Zhang (2012), “Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China,” *Catena*, 92: 139–154.
25. Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss and F. Baret (2004), “Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography,” *Agric. For. Meteorol.* 121: 19–35.
26. Kleinbaum, D.G. (2010) “Logistic Regression-A Self-Learning Text,” third edit. Ed, Springer, Atlanta, GA, USA.
27. Kokutse, N., T. Fourcaud, K. Kokou, K. Neglo and P. Lac (2006), “3D numerical modelling and analysis of the influence of

- forest structure on hill slopes stability,” Disaster Mitig. Debris Flows, Slope Fail. Landslides, 561–567.
28. Lai, J., B. Yang, D. Lin, A.J. Kerkhof and K. Ma (2013), “The allometry of coarse root biomass: log-transformed linear regression or nonlinear regression?” PLoS One, 8(10).
29. Mao, Z., F. Bourrier, A. Stokes and T. Fourcaud (2014), “Three-dimensional modelling of slope stability in heterogeneous montane forest ecosystems,” Ecol. Modell, 273(10): 11–22.
30. Nadim, F., O. Kjekstad, P. Peduzzi, C. Herold and C. Jaedicke (2006), “Global landslide and avalanche hotspots,” Landslides, 3(2): 159–173.
31. Roering, J.J., K.M. Schmidt, J.D. Stock, W.E. Dietrich and D.R. Montgomery (2003), “Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range,” Can. Geotech. J., 40(2): 237–253.
32. Schwarz, M., F. Preti, F. Giadrossich, P. Lehmann and D. Or (2010), “Quantifying the role of vegetation in slope stability: a case study in Tuscany (Italy),” Ecol. Eng. 36(3): 285–291.
33. Sidle, R.C. and H. Ochiai (2006), “Landslides: processes, prediction, and land Use,” American Geophysical Union. Water Resources Monograph, Washington, DC, USA.
34. Slik, J.W.F., C.S. Bernard, F.C. Breman, M. Van Beek, A. Salim and D. Shei (2008), “Wood Density as a Conservation Tool: Quantification of Disturbance and Identification of Conservation-Priority Areas in Tropical Forests,” Conserv. Biol. 22(5): 1299–1308.
35. Soethe, N., J. Lehmann and C. Engels (2006), “Root morphology and anchorage of six native tree species from a tropical montane forest and an elfin forest in Ecuador,” Plant Soil, 279: 173–185.
36. Sørensen, R. and J. Seibert (2007), “Effects of DEM resolution on the

- calculation of topographical indices: TWI and its components,” J. Hydrol., 347: 79–89.
37. Stokes, A., C. Atger, A.G. Bengough, T. Fourcaud and R.C. Sidle (2009), “Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides,” Plant Soil, 324: 1–30.
38. Tanaka, T., M. Taniguchi and M. Tsujimura (1996), “Significance of stemflow in groundwater recharge .2. A cylindrical infiltration model for evaluating the stemflow contribution to groundwater recharge,” Hydrol. Process. 10: 81–88.
39. Taniguchi, M., M. Tsujimura and T. Tanaka (1996), “Significance of stemflow in groundwater recharge .1. Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach,” Hydrol. Process, 10(1): 71–80.
40. Vyskot, M. (1976), “Tree story biomass in lowland forests in South Moravia,” Rozpravy CSAV 86 (10), Academia Praha.

水土保持學報 51 (2): 2825-2844 (2021)

Journal of Soil and Water Conservation, 51 (2): 2825-2844 (2021)

110 年 9 月 18 日收稿

110 年 10 月 14 日修改

110 年 10 月 25 日接受