

以坡地土壤厚度及垂直結構探討淺層崩塌潛勢區位

詹孟浚 梁偉立*

摘要 判斷淺層崩塌潛勢的因子中，地表下不可視的土壤厚度、土壤垂直結構和基岩面地形等因子各別有不同的促崩機制和影響力。本研究利用簡易貫入試驗調查坡地的土壤垂直結構、土壤厚度及推估基岩面地形，瞭解這些因子的空間變異，並以樣區中發生的小崩塌為基礎探討各個因子對淺層崩塌潛勢區位的判釋能力。結果顯示土壤厚度具有空間變異，說明土壤厚度調查的重要性。在崩塌單一因子的分析中，以土壤厚度評估高崩塌潛勢區域 (PSFL) 所得的分布面積最小，且皆分布於崩塌位置附近，說明土壤厚度在崩塌潛勢的預測中佔有相當重要的角色。由崩塌地的貫入試驗和崩塌剖面觀察所得土壤垂直結構資訊，推測水分垂直移動受硬度較高的土壤層、塊石、基岩面阻擋，使得局部孔隙水壓上升進而引發淺層崩塌。這顯示土壤結構的影響力，也說明了相同的崩塌機制亦可能發生在具有同類土壤垂直結構的區域。根據本研究結果，建議就評估臺灣坡地水文過程及坡地穩定而言，應重視土壤厚度及土壤結構異質性在評估淺層崩塌潛勢區位的影響力。

關鍵詞：基岩面地形、淺層崩塌、土壤厚度、土壤垂直結構。

Assessment of The Location of Potential Shallow Slope Failure with Soil Depth and Vertical Soil Structure Data

Meng-Chun Chan Wei-Li Liang*

ABSTRACT The factors related to shallow slope failures include soil depth, vertical soil structure, and bedrock topography. In this study, we surveyed spatial variations of soil depth and vertical soil structure by conducting simplified penetration tests, and then estimated bedrock topography in a newly-planted hillslope. We analyze the ability of these three factors to detect potential slope failure locations (PSFL) on the basis of information from a shallow slope failure which occurred at the study site during the survey period. The results show that soil depth varies spatially on the hillslope. However, there are no obvious correlations between soil depth and any topographic factor. This finding differs from the results suggesting an inverse correlation between soil depth and slope in some previous studies. Comparing the three factors, the area of PSFL determined by soil depth is the smallest. This implies that soil depth plays an important role in predicting the potential of a shallow slope failure. According to information about vertical soil structure, we presume that vertical rainwater infiltration is impeded by local hard soil layers, rocks, and the soil-bedrock interface, and following increase of pore water pressure might trigger shallow slope failure. This indicates that vertical soil structure has implications for vertical soil water movement and PSFL. Consequently, we suggest that the spatial variations of soil depth and vertical soil structure should be carefully considered when assessing potential locations for shallow slope failures in Taiwan.

Key Words : Bedrock topography, shallow landslide, soil depth, vertical soil structure.

一、前 言

淺層崩塌是現今臺灣山區在豪雨過後經常面對的嚴重課題，由於其破壞力強且難以預測，經常造成生命財產的巨大損失。目前國內與崩塌相關的研究，多著重在崩塌的分類、集水區中崩塌數與面積的統計、以及透過崩塌位置與地形地質因子的相關性和力學原理，推估各坡面的崩塌潛勢（陳則佑等，2011；陳樹群、馮智偉，2005；蘇苗彬等，2009）；然而，鮮

少研究從坡面單元崩塌的機制探討崩塌發生的原因（黃景川等，2011），國內對淺層崩塌也尚未提出明確的定義。根據國外研究，從崩塌的機制定義淺層崩塌為岩層或風化岩層之上的土壤層崩壞現象（內田等，2009；Montgomery et al., 2002），降雨促發的淺層崩塌除了坡地本身具有的地理、地質與土壤特性外，水分的移動是很重要的促崩機制，因此在這些研究中，由水文表現的角度定義和探討淺層崩塌。

崩塌的影響因子眾多，為了釐清淺層崩塌之機制及崩塌潛

勢區域，許多研究以統計方式或物理力學的角度，探討地形、地質、土壤特性、水分分布、植生與人為開發等因子間的關係，嘗試找出具有高崩塌潛勢的區域（陳則佑等，2011；黃宏斌等，2006；Dietrich et al., 1995；Montgomery and Dietrich, 1994）。然而，各因子促成崩塌發生的機制各不相同，雖然以地表的地形或地理資訊可有效判釋出具高崩塌潛勢的區域，由於崩塌的破壞面是發生於地表下，若要進一步提升預測崩塌潛勢的準確度，應對地表下土壤或岩層因子進行調查，瞭解其空間變異及促崩機制。

在邊坡穩定評估中，坡度較大、土壤較厚的區域代表土體有較大的剪應力，應有較高的崩塌潛勢；而就水分分布的角度而言，水分匯集的區域會使孔隙水壓上升，降低土體的抗剪強度，是重要的促崩機制（黃景川等，2011）。根據前人研究，土壤厚度具有空間變異性（Freer et al., 2002），我們應透過現地調查或推估的方式找出坡地土壤較厚的區域。基岩面（土壤岩石交界面）上方的土壤含水率、飽和側向流量與基岩面地形的相關性較地表面高，若要預測地表下水分側向匯集的區域，則應掌握基岩面的地形。另一方面，水分垂直入滲若遇到透水性差的土層或岩石，亦有可能在其上方孔隙水壓迅速增加（Masaoka et al., 2012），促使淺層崩塌的發生，因此，從水分垂直移動的角度而言，土壤垂直結構與淺層崩塌潛勢也有密切的關係。

在眾多邊坡穩定分析或淺層崩塌潛勢評估的模式中，土壤厚度是不可或缺的因子。然而，由於土壤厚度不易測量，多數的研究嘗試建立土壤厚度和地形因子間的關係曲線以推估土壤厚度的空間分布，如陳建新等（2013）、Chu et al. (2013)、Delmonaco et al. (1999) 和 Salciarini et al. (2006) 便透過現地實測或前人經驗中土壤厚度和坡度的關係曲線，推估集水區尺度下土壤厚度的空間分布。雖然上述研究及目前國內關於土壤厚度的研究（姜壽浩、徐美玲，2006）均建立集水區尺度或跨集水區尺度下間接推估土壤厚度的方法，卻少見針對單一坡地單元進行土壤厚度的調查，因此對於坡地單元土壤厚度的空間分布、土壤厚度和地形間的相關性、以及集水區尺度下的推估式是否適用於坡地尺度土壤厚度的推估，相關瞭解或資料仍相當不足。

本研究以一新植造林坡地為樣區，採用多點、高密度的測量方式，測量坡地地表微地形量、土壤垂直結構、土壤厚度等資料。因資料收集後樣區中發生一淺層崩塌，藉由崩塌前後資料之比對及分析，探討下列之議題：

1. 地表地形是否足以推估基岩面地形？地表地形、基岩地形與土壤厚度是否有相關性？
2. 以崩塌後之崩塌剖面觀測資料為依據，探討樣區坡地土壤厚度及垂直結構資料對淺層崩塌潛勢區位之判釋能力。

二、材料與方法

1. 試驗樣區及淺層崩塌概述

本試驗樣區位於國立臺灣大學實驗林管理處內茅埔營林區第 21 林班 100-20 號造林地（圖 1a），海拔高約 1250m。試

驗樣區的前身為茶園，於 2011 年回收後移除地表茶樹，開始造林。試驗樣區在同年其後建立，調查地形量及土壤結構資訊，研究期間並未有人工整地或是對地形、土壤、岩層的干擾。樣區為一坡地單元（圖 1b），縱長 120m、寬 80m，由周圍的道路、溪溝、山壁界定出樣區範圍，坡向朝東，平均坡度約 40%（22°），最大坡度達 97%（44°）。樣區內栽植約 1-2 年生之烏心石、光臘樹等闊葉樹，草本植物生長茂密。部分區域有巨岩裸露於地表，地表面有若干水泥鋪面步道橫貫以及岩層裸露的溪溝，土壤中皆富含碎石，根據地質鑽探資料，本試驗樣區為一崩積區域，塊石及土壤交雜。根據經濟部中央地質調查所公布的地質調查資料，本樣區所處區域的地質組成以砂岩及頁岩為主，在樣區周圍觀察到大面積連續的裸露平滑岩面，推估樣區有連續的岩面。

在 2012 年 8 月 13 日的現地勘查中發現樣區坡面中段發生小規模的崩塌（圖 1a、1c），其崩塌長、寬、縱深約 4.0m、3.0m、1.1m，最大坡度約 55%（29°）；距離樣區 30m 處有一較大規模淺層崩塌的發生（圖 1a、1d），其崩塌長、寬、縱深約 36m、3.6-6m、1-2m，最大坡度約 76%（37°），推測此二淺層崩塌是 2012 年 8 月 2 日蘇拉颱風帶來的強降雨所致，樣區雨量自 8 月 1 日 15:00 至 8 月 3 日 2:00 記錄的累積雨量達 1132.5mm，最大時雨量達 99.5mm/hr。除了淺層崩塌外，在樣區中水泥步道也觀察到多處路基掏空的現象，可見蘇拉颱風帶來的強降雨降低土壤穩定性，造成土壤流失和土體破壞。

2. 地表地形及土壤厚度、垂直結構測量

為了獲得地表面地形資料，本研究以雷射測距儀（TruePulse 360B, LASER TECHNOLOGY, INC.）測量地表測點的相對座標。樣區中共有 701 測點，測點在地表均勻分布，兩點間距約 5 公尺，另外於地形變化急遽的隆起或下凹處，增加測點密度，以表現該區域特殊的變化。由於樣區的崩塌地是在地表測量結束後才出現，因此崩塌形質調查以皮尺粗略量測長、寬及深度，並拍照作記錄。

研究中以簡易貫入試驗獲得土壤硬度垂直變化及土壤厚度資訊，雖然多點式貫入試驗、調查花費大量人力；但相較於費用高昂之鑽探、解析度較低之地球物理探測法（透地雷達、大地比電阻、震波探測等），利用簡易貫入試驗判斷基岩面位置為一經濟、有效之方法，其操作簡便、適用於坡地環境調查更為其優點。

文中所稱之「基岩面」為利用簡易貫入試驗判斷的土壤-岩石交界面（soil-bedrock interface）。簡易貫入計分為錐頭、貫入桿、打擊桿及重錘等部位（圖 2），錐頭直徑為 20mm，貫入桿直徑 16 mm，錐角 60°，重錘重量 2kg，落下高度 50cm。

測量方法是將貫入計放置於土壤表面並使貫入桿與重力方向平行，將重錘自打擊頭拉升 50 cm 至頂端後，使之自由落下撞擊打擊頭，將貫入桿打入土壤，記錄每一次擊打後貫入桿位移的距離（貫入量）。貫入數據的換算處理，以阻抗值 N_h （擊打次數/10 cm）代表土壤硬度：

$$N_h = 10 \times N/d \quad (1)$$

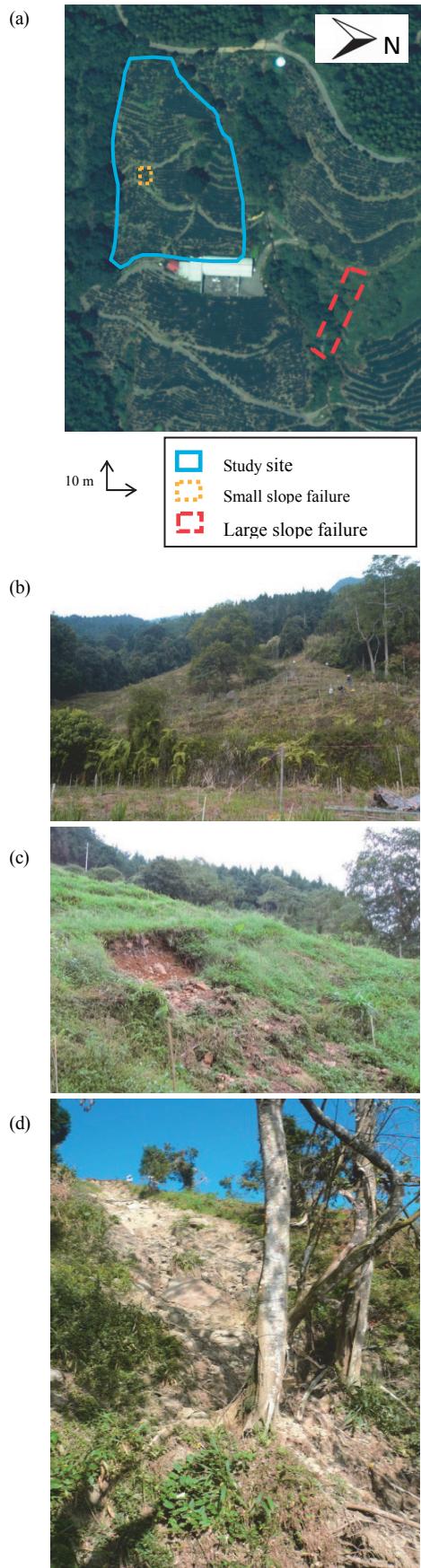


圖 1 (a) 試驗樣區航照圖，(b) 樣區照片(坡頂朝東)，(c) 小
淺層崩塌地，(d) 大淺層崩塌地照片

Fig.1 (a) Aerial photograph of study site and photographs
of (b) the study site (east slope), (c) the small slope
failure, and (d) the large slope failure

式 (1) 中 N (次) 為連續擊打次數, d (cm) 為相對應的貫入量, N_h 值代表針對同一土層要貫入 10cm 所需的擊打次數, 數值越大代表土壤硬度越高。當貫入錐頭撞擊到基岩面時, 每次擊打的貫入量會變得很小, 參考前人研究之貫入阻抗的結果 (Okimura and Tanaka, 1980; Yoshimatsu et al., 2002), 當連續擊打 10 次而貫入量不到 1cm 時 (意即 $N_h > 100$), 視為接觸至基岩面, 因此本研究設定當上述情形連續出現三次則結束該點的測量, 並判斷第一次貫入阻抗上升時的深度為土壤厚度。

貫入點在樣區中均勻分布, 共測量 141 點, 並根據這些點的地表高程和土壤厚度推估基岩高程, 進而推估基岩面的地形。

本研究依據 N_h 值垂直變化形態略分為二類 (表 1): Type 1 各深度 N_h 值皆小且無明顯垂直變化, 土壤岩層分界明顯; Type 2 的土壤 N_h 值有明顯垂直變化, 可看出垂直方向交雜硬度較高的土壤層或有塊石存在。此種分類方法是為了分別土壤垂直方向是否有硬度較高的分層存在, 根據 Masaoka et al. (2012) 進行貫入試驗與土壤分層的研究, N_h 值越高的土壤, 饰和水力傳導度越低, 即硬度較高的土層可能會阻礙水分的垂直滲透, 進而影響水分垂直移動過程。

3. 地形濕度指數 (topographic wetness index, TWI) 計算

將 141 個貫入點測得的地表高程和基岩面高程的三維座標輸入地形繪圖軟體 (Surfer ver.10), 以 Kriging 法建立地表和基岩面之網格狀數值高程模型 (digital elevation model, DEM), DEM 之空間解析度為 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。

本研究利用地形濕度指數 (TWI) 推估地表及基岩面地形之匯流能力。TWI 是以地形起伏推估在穩定狀態 (steady state) 時, 地形面上任一區域水流匯集之能力 (Beven and Kirkby, 1979), 其計算式為:

$$TWI = \ln(a/\tan \beta) = \ln[(CA/b)/\tan \beta] \quad (2)$$

式 (2) 中 a (cm) 是目標網格的比集流面積 (specific catchment area), 由目標網格的上坡集流面積 (upslope contributing area, CA, 單位為 cm^2) 除以該網格流出口的寬度 b (cm),

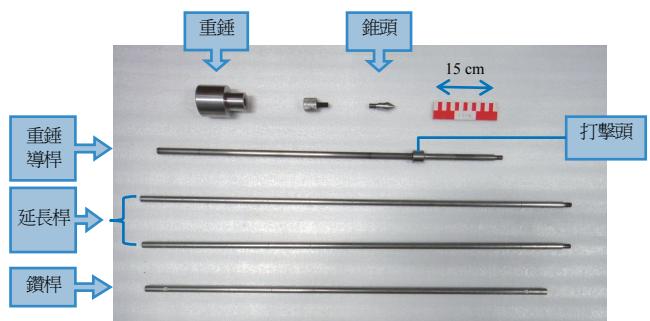


圖 2 簡易貫入計照片，包含錐頭、鑽桿、延長桿、重錐導桿及重錘

Fig.2 One set of simplified penetrometer including a penetration cone, a penetrometer rod, 2 extension rods, a weight guide shaft with a knocking head, and a weight

即網格寬度 200cm； $\tan\beta$ 是目標網格往四周移動的最大坡度。本研究採用 Tarboton (1997) 提出的 D-infinity 法計算水分在地形面上移動的坡度、流向、 $\tan\beta$ 和 CA。計算方式以目標網格與周圍網格劃分出的八個直角三角形，利用各網格點的高程，篩選出最大的坡度為 $\tan\beta$ ，並以該坡度的方向作為水分最可能的流向。再以流向在直角三角形中與兩個網格的夾角比例，作為目標網格往下游二個網格的分配比例。CA 是目標網格上坡的總水分貢獻面積，以遞迴方式向目標網格上游尋找所有會流入該網格的貢獻網格，最終將所有貢獻網格的面積乘上貢獻度，加總即是目標網格的 CA。

CA 代表任一網格具有的潛在水分供給面積，亦可推估潛在水分供給量，一般而言，靠近稜線、上坡面或微地形隆起的區域 CA 會較小，而在坡腳及低凹處 CA 會較大。 $\tan\beta$ 則假設可代表飽和帶的水力梯度 (hydraulic gradient)，用以推估飽和水帶的側向流動速度。TWI 將兩者結合，推估輸入量與輸出量間的比例，當一個區域的輸入量遠大於輸出量，則 TWI 較高，顯示水分較容易在這個區域累積。

4. 崩塌前後資料之比對及分析

樣區中淺層崩塌地的資訊有助於評估各個因子可能促成崩塌發生的影響程度、範圍，因此於崩塌地附近選擇 5 個地點進行貫入試驗，同時觀察崩塌剖面之土壤結構、土壤分層及岩石分布狀況，並藉由崩塌地之坡度、TWI、土壤厚度、土壤垂直結構等資訊評估樣區崩塌潛勢區域。

若不考慮植生根系補強因素，一般而言，坡度較大或土壤較厚的區域其土體具有較大的下滑力，該區域土體穩定性較低。而 TWI 較大之處因水流匯集能力較高，降低土體的剪力強度及穩定性。就土壤水移動的觀點而言，土壤岩層分界明顯的 Type 1，其土壤水垂直滲透的樣式較為均一；土壤及塊石交雜的 Type 2，受塊石交雜的影響，優勢流、難透水部位存在，其土壤水垂直滲透的樣式較非均一。Type 2 垂直滲透的水分較容易匯集於小區域，預期該區域土體穩定性較低。

本研究基於此概念，就單一因子而言，假設樣區中坡度、土壤厚度、TWI 中任一因子大於或等於小崩塌地之區域，以及土壤垂直結構類型與崩塌地相同的區域，可評估為根據該因子具有與崩塌地相同的崩塌條件，視為高崩塌潛勢之區域 (po-

tential slope failure location，後簡稱 PSFL)。依據各因子所繪出之 PSFL 的空間分布及面積，分析各因子在崩塌發生的判釋能力，進而探討評估淺層崩塌潛勢區域時最重要的資訊為何。

三、結果

1. 樣區土壤及地形特性

依樣區中 146 個貫入點的資料，土壤厚度介於 13-227cm 間，平均值為 77cm，標準差為 41cm，次數分配呈鐘形微右偏 (圖 3a)。圖 3b 是土壤厚度的空間分布，具有相當大的空間變異，樣區左右兩側土壤較厚；而在樣區中間偏左側縱向凹溝的

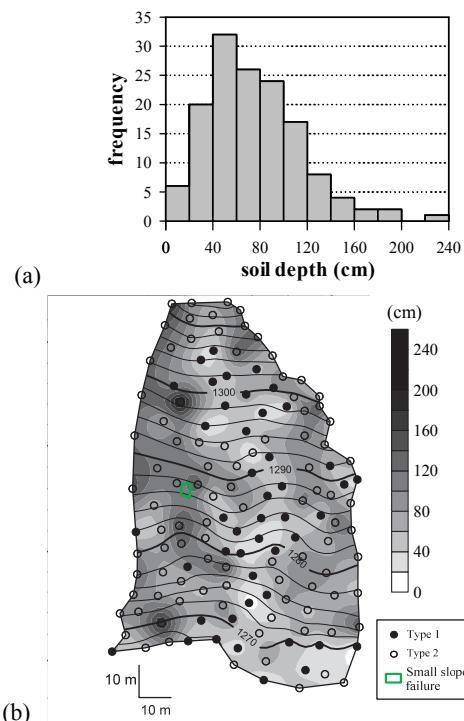


圖 3 (a) 土壤厚度次數分配圖，(b) 土壤垂直結構分類 (點位) 和土壤厚度 (色階) 的空間分佈，黑線為地表面等高線 (m)

Fig.3 (a) Histogram of soil depth, (b) spatial distributions of vertical soil structure types (point) and soil depth (gray scale) with contour line (black line)

表 1 依阻抗值垂直分佈的土壤垂直結構分類

Table 1 Classification of vertical soil structure decided by vertical N_h distribution

類型	Type 1	Type 2
示意圖	N_h (drop/10 cm) depth (cm)	N_h (drop/10 cm) depth (cm)
說明	各深度 N_h 值皆小且無明顯垂直變化，土壤岩層分界明顯。	土壤 N_h 值有明顯垂直變化，可看出垂直方向交雜硬度較高的土壤層或有石頭存在。

土壤較薄，甚至有部分區域岩石裸露，無土壤覆蓋。貫入點 N_h 值垂直分布依表 1 的規則分類，兩種垂直硬度分布類型在樣區中的空間分布如圖 3b。Type 1 和 Type 2 出現的比例分別為 28% 和 72%，其中，Type 1 主要分布於樣區中間左側縱向凹溝，該處土壤較薄；而 Type 2 則分布於左右兩側坡面，土壤層較厚。圖 4a 是現地測量的地表面及基岩面地形等高線圖，可看出在樣區下坡處的左右兩側各有一條縱向凹溝。因土壤厚度具有空間變異，在局部區域可見地表面和基岩面起伏程

度的差異，但就坡地整體而言，地表面和基岩面地形起伏呈現相近的趨勢。地表面和基岩面不論是坡度、流向（圖 4b）、CA（圖 4c）或 TWI（圖 4d）的分布情形都很相似，樣區上方及右側凹溝周圍的坡度最陡，達 45% 以上；坡面左右兩側的凹溝和坡面下方平台有較大的 TWI。根據流向和 TWI，推測在穩定狀態下，水分在基岩面上的側向流動會匯集於樣區左右兩側縱向凹溝的下方。

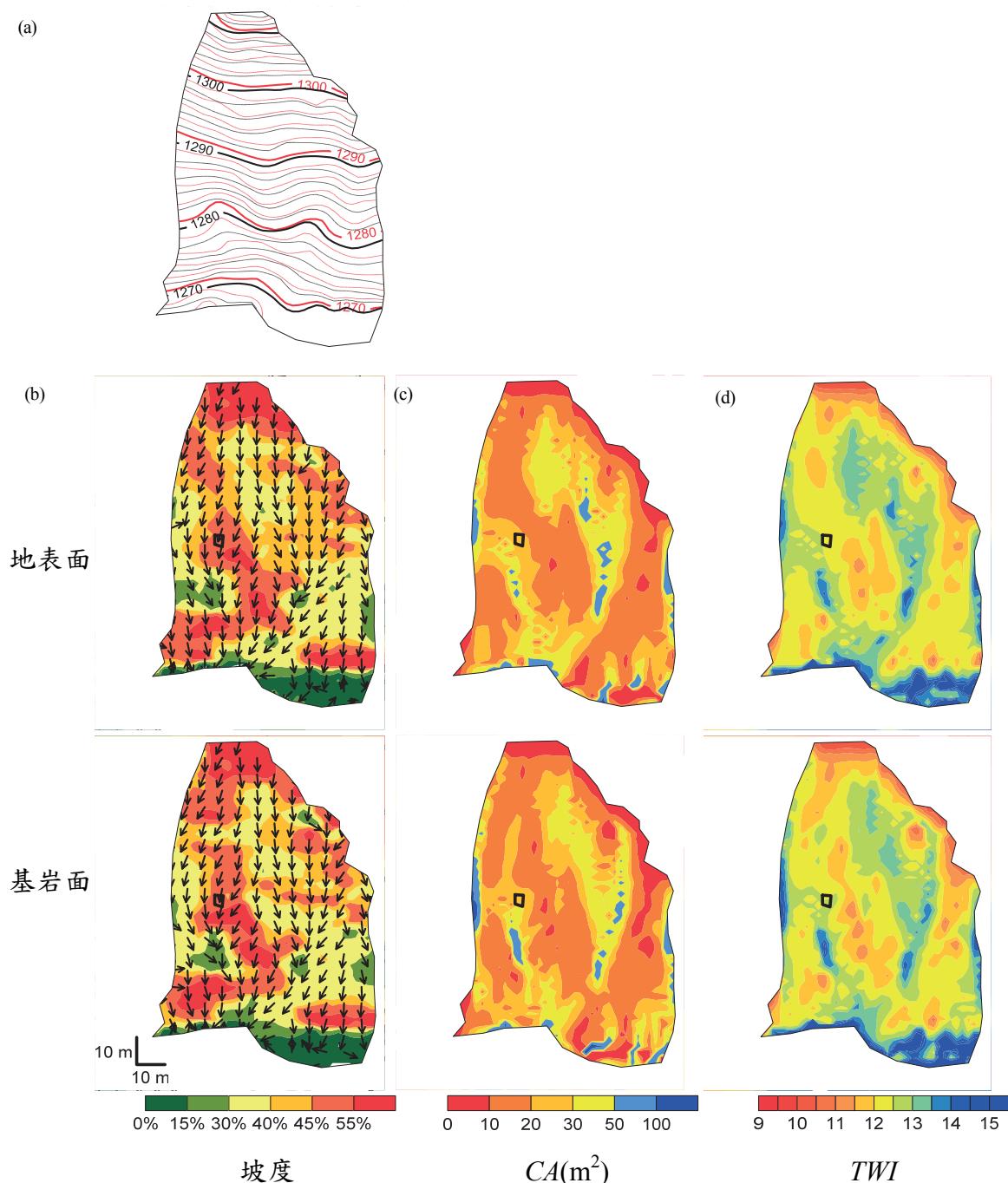


圖 4 (a) 地表面 (黑線) 和基岩面 (紅線) 的等高線圖 (單位: m)。地表面和基岩面的 (b) 坡度 (色階) 和流向 (箭頭)、(c) 集流面積 (CA) 以及 (d) 地形濕度指數 (TWI) 的空間分佈圖，圖中黑框為小崩塌位置

Fig.4 (a) Contour maps of the surface (black line) and bedrock (red line). Spatial distributions of (b) slope (color) and flow direction (arrow), (c) contributing area, and (d) topographic wetness index at the surface and bedrock

比較土壤厚度與地形資訊的關係(圖 5)可知，土壤厚度與地表面、基岩面的坡度、CA、TWI 相關性皆很小(R^2 皆小於 0.1)。雖然土壤厚度與地表面、基岩面坡度間的 P 值 < 0.001 ，但統計趨勢薄弱。此結果顯示本樣區土壤厚度的空間分布難以利用地形因子來推估。

2. 淺層崩塌處土壤結構性質

崩塌地剖面緊鄰一條水泥步道下方，崩塌土方堆積於下方 3-5m 處，使得外觀如一楔形(圖 1c、6a)。藉由現場觀察發現崩塌剖面土壤分層明顯(圖 6a)，崩塌破壞面與基岩面的深度位置一致，為一典型的淺層崩塌。剖面中央約 50 cm 深附近富有大量石塊，顏色偏灰，石塊間可見明顯孔隙、質地疏鬆；更深層處土壤偏黃，質地較細密，基岩面附近亦可見相當多的大小石塊。

比較崩塌地周遭 5 個貫入地點的結果(圖 6b)，P2 和 P3 贫入至 50-70cm 深即停止，觀察崩塌剖面，此二點的貫入停止深度並非基岩面的位置，而是受堆疊的大石頭阻擋而停止；P4 贫入深度約 108cm，應為基岩面的深度，與崩塌深度吻合；P1 和 P5 的貫入深度分別達 107 和 150cm，推估崩塌地附近的土壤厚度約在 110-150cm 左右。就貫入點垂直硬度分布類型而言，除了 P3 屬於 Type 1，其餘 4 點皆為 Type 2，並且可看出這 4 點垂直方向都有許多硬度高的分層交雜於土壤中，例如各點 40-50cm 的 N_h 值都達 50 以上，P2 在 40cm 以下則有多處 N_h 值達到 100。

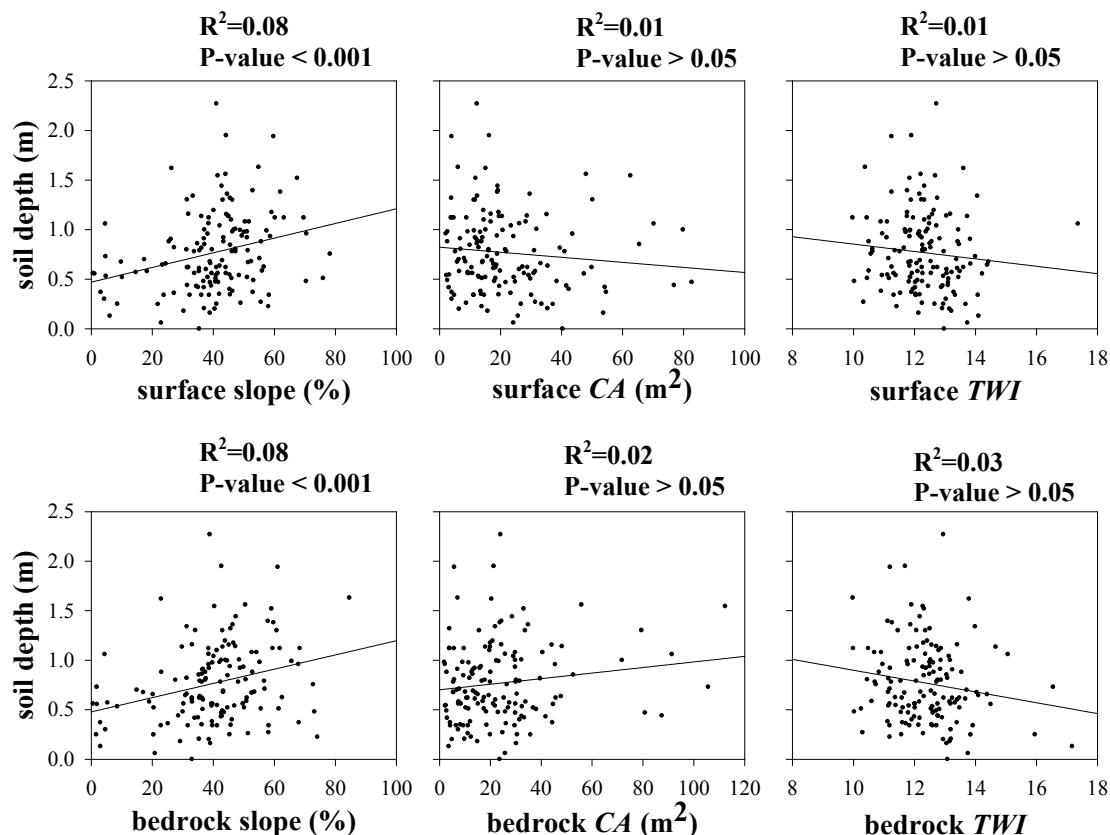


圖 5 土壤厚度與地表面、基岩面的坡度、CA 和 TWI 的散布圖

Fig.5 Relationships between soil depth and slope, contributing area (CA), topographic wetness index (TWI) at the surface and bedrock

3. 樣區淺層崩塌潛勢區域推估及其影響因子分析

崩塌地位置之地表面坡度介於 45-55%(或 24-29°)，TWI 介於 12-12.5，基岩面坡度亦介於 45-55%，TWI 則介於 12.5-13(圖 4)。崩塌發生前藉由貫入試驗所推估之崩塌地位置土壤厚度介於 110-130cm，垂直硬度分布類型皆屬於 Type 2(圖 3b)，此結果與崩塌發生後剖面觀察的結果吻合(圖 6)，證明以貫入試驗推估不可視的土壤結構、基岩面深度資訊可被信賴。

圖 7，將地表面坡度大於 45%、TWI 大於 12，基岩面坡度大於 45%、TWI 大於 12.5，土壤厚度大於 110cm，土壤垂直硬度分布為 Type 2 的區域，作為根據單一因子推估的高崩塌潛勢區域(potential slope failure location, PSFL)。若就面積比例而言，以土壤厚度評估之 PSFL 範圍最小，其次是以地表坡度、基岩面坡度、基岩面 TWI，而土壤垂直結構、地表面 TWI 所評估之 PSFL 範圍最大。若就空間分布而言，以地表及基岩面坡度所評估之 PSFL，兩者空間分布大致相同；依土壤厚度與垂直結構所得之 PSFL 空間分布及面積比例相異性很大。若取 6 個因子判釋 PSFL 的交集，其範圍只限於從崩塌地至其下坡 10-15m 處的範圍，可合理推測該範圍有極高的崩塌潛勢，面積僅佔樣區的 2%。若只考量土壤厚度因子，可將 PSFL 限縮於樣區中面積 14% 的區域，而土壤厚度不論與其餘任何評估標準配合，皆可將 PSFL 的範圍限縮於樣區中 10% 以下的區域。

四、討論

就樣區整體而言，地表面和基岩面地形起伏相近，但由於土壤厚度具有很大的空間變異，就局部區域而言，仍可看出兩者起伏的差異。此結果雖與 Freer et al. (2002)、Masaoka et al. (2012) 研究中地表面和基岩面地形有顯著差異的結果不同，但若著眼於坡地單元尺度下基岩面地形是控制地表下水分移動的主要因子，以及在基岩面坡度較大或匯流能力高的局部區域可能成為崩塌發生的重要地點，透過直接或間接方式推估基岩面地形仍是相當重要的。

土壤厚度因子相較於坡度、TWI 和土壤硬度分布類型，是各評估因子中能將 PSFL 面積限縮至最小 (14%) 的因子。根據此結果，推測在本研究樣區中，因土壤較厚使土體具較大的下滑力是促成崩塌發生的重要原因。相較於此，以 TWI 評估的 PSFL 遍布整個樣區 (地表面 TWI 佔 76%，基岩面 TWI 佔 41%)，崩塌地並非位於側向水分匯集的凹溝下方，故推測地表下側向流動並非促成小崩塌發生的主要機制。

根據崩塌地及附近貫入點的土壤硬度分布類型皆屬於 Type 2，以及崩塌剖面觀測到土壤有顏色和質地的分層，推測水分在垂直向下移動時遇到難透水層 (塊石或硬度較高的土

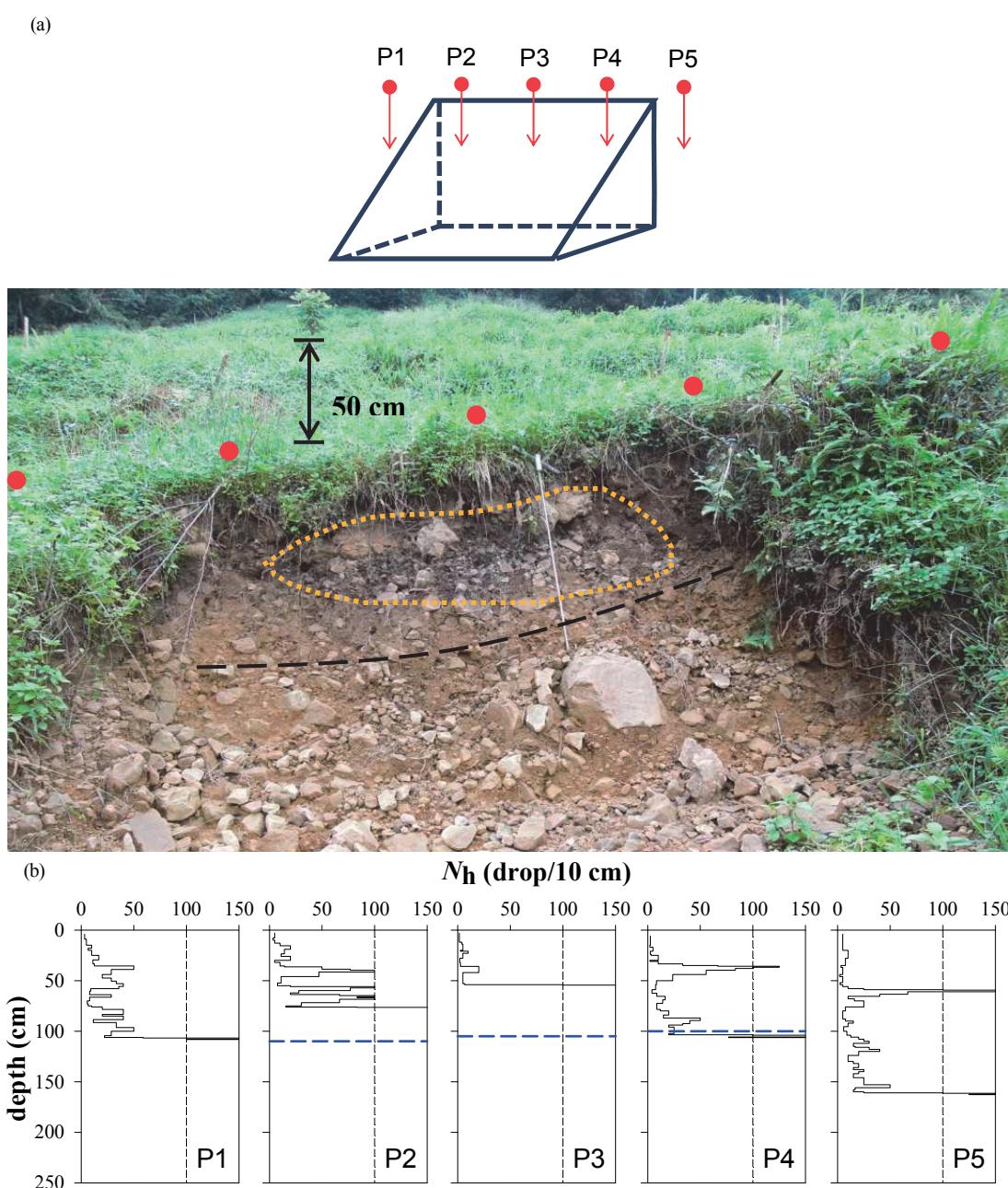


圖 6 (a) 小崩塌貫入點位示意圖與崩塌剖面照片，紅點為貫入位置；黑色虛線為現場判釋的崩塌剖面深度，距離地表約 110 cm；橙色虛線範圍土壤顏色與下方不一，且富含石塊。(b) 小崩塌地貫入阻抗值垂直分佈圖，P2 - P4 中橫藍虛線為現場崩塌剖面深度

Fig.6 (a) Schematic diagram, photograph of the small slope failure and locations of penetration tests. (b) Vertical distributions of N_h value for 5 penetration test locations

壞)而匯集，使孔隙水壓在某個深度短時間內增加，是可能的促崩機制。在崩積土覆蓋的坡面，簡易貫入試驗所得的基岩面為「水文學上的土壤與岩石交界面」，不論為新鮮母岩、風化岩層或崩積土中的塊石，因為在土壤與岩石交界區間保水性與透水性的變化差異大，使得土壤水局部飽和帶或棲止水的形成，造成該位置孔隙水壓的敏銳變化，進而影響到土體力學上的平衡。相同的機制亦可能發生於樣區中 72% 同類型土壤結構的區域，而土壤硬度變化的交界面可能成為滑動面的位置。藉由此兩種分類，可以在初期簡易分辨土壤水垂直滲透的樣式，對於具有較複雜條件處，可進一步進行詳細的調查或觀測。

過往的研究在評估崩塌因子時常將各種地表面的地形特徵 (terrain feature) 或地形屬性 (terrain attribute) 納入分析，但少有研究考量地表下不可視的土壤、岩層因子在崩塌事件中的解釋力。內田等 (2009) 以地形、土壤厚度、土壤內摩擦角、內聚力、水力傳導係數等空間上實際的觀測資料，套用無限長邊坡穩定分析模式 (infinite slope stability model)，比較 1999 年在日本廣島所發生的淺層崩塌地點，探討眾多因子中的重要

順位。其結果發現在眾多影響因子中，土壤厚度的空間分布最能反映出崩塌潛勢地點，並建議即使是利用簡易的邊坡穩定分析模式，只要考慮了土壤層厚度及基岩面地形的空間分布，便能有效提高崩塌發生地點的預測精確度。

本研究中顯示即便同時考量地表面坡度和 TWI，判斷 PSFL 的面積仍較以土壤因子判斷的面積還大，而任意因子只要搭配土壤厚度，推估的 PSFL 範圍即限縮於小崩塌地附近，且依此推估的 PSFL 皆分布於崩塌位置附近，說明考量土壤厚度的空間分布有助於判斷高崩塌潛勢的區域，以及土壤厚度在評估崩塌發生位置的重要性。

由於樣區土壤厚度與坡度、CA、TWI 等地形因子相關性皆低，顯示樣區土壤厚度的空間分布難以利用前人研究之關係式或模型來進行廣域推估 (陳建新等, 2013; Chu et al., 2013; Delmonaco et al., 1999; Salciarini et al., 2006)。台灣山區崩塌、土石堆積的活動頻繁，土壤厚度的空間分布難以由地表因子推估；然而，土壤厚度是推估土體穩定性的重要因子，故凸顯土壤厚度現地調查的需要。

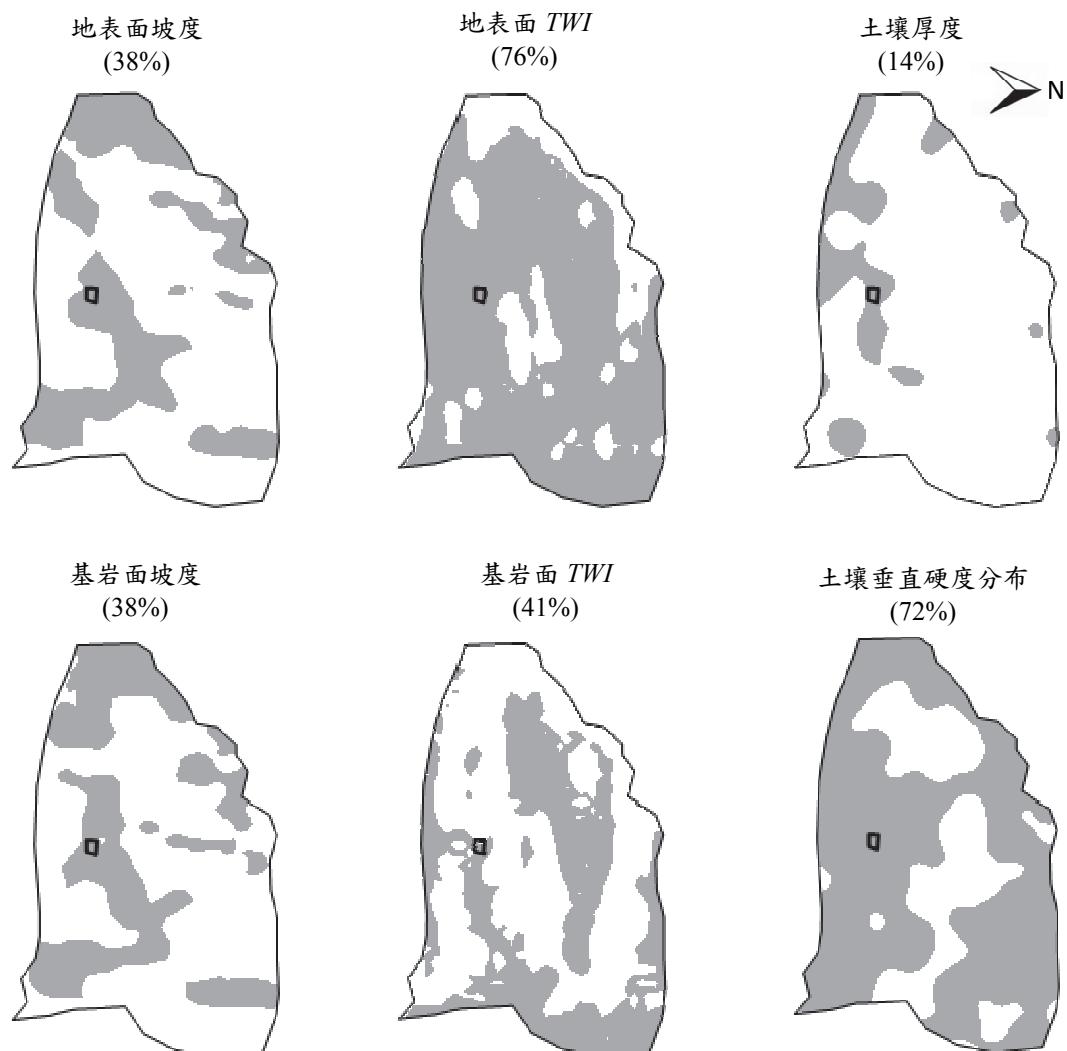


圖 7 依 6 個評估標準所得之樣區中具崩塌潛勢區域 (灰色區域)。括號內為滿足各標準的區域佔全樣區的面積比例

Fig. 7 Potential slope failure locations (gray area) assessed by surface slope, surface TWI, bedrock slope, bedrock TWI, soil depth, and vertical soil structure

本研究中就力學角度而言，假設坡度較大、基岩面上方土壤較厚的區域，有較高的崩塌潛勢。*CA*、*TWI* 較大的區域，在水分沿地形面側向移動時較容易匯集水流，而土壤垂直結構中存在硬度較高的土壤層或岩石 (Type 2)，會阻擋水分垂直向下移動，造成孔隙水壓的上升、降低土體穩定性。透過比較地形、土壤厚度、土壤垂直結構因子推估的崩塌潛勢區面積，除了瞭解各因子的判釋能力外，其結果並顯示土壤厚度是判釋崩塌潛勢的重要因子；而由崩塌地土壤垂直結構類型，推測該崩塌應屬於土體孔隙水壓上升導致的破壞，進一步說明由於土壤、岩石的空間分布及結構會影響水分在地表下的移動。本文建議若欲探討淺層崩塌潛勢區位，應納入考量土壤、岩石的垂直結構與相應的水分移動，由崩塌的機制面探討崩塌的地點、時間，將是提升預測準確度的努力方向。

崩塌地現地研究中，多數為崩塌後的分析，以鄰近區域之特性推估崩塌地的狀況，就不可視的地層資料而言，鮮少有崩塌前後的資料可供比對。本研究調查期間適逢崩塌的發生，其崩塌規模雖小，但因此可以比較崩塌前後的調查資料，相信此調查結果可以提供日後相關研究之參考。

五、結論及建議

本研究利用簡易貫入試驗進行坡地單元土壤硬度垂直變化及土壤厚度空間分布的現地調查，並探討樣區各因子對淺層崩塌潛勢地點之判釋能力，所得結論如下：

1. 土壤厚度具很大的空間變異性，在坡面凹溝處土壤較薄而其他區域較厚。土壤厚度與地表面、基岩面的坡度、*CA*、*TWI* 相關性皆低，此結果與前人研究中土壤厚度隨坡度增加而越小的關係不同。
2. 整體而言，本樣區的地表面和基岩面地形起伏相似，故坡度、流向、*CA* 和 *TWI* 的分布沒有顯著差異。但就局部區域而言，由於土壤厚度具空間變異，地表面和基岩面地形起伏仍有明顯不同。若著眼於基岩面對地表下水流的控制以及局部區域較高的坡度和匯流能力可能具有較高的崩塌潛勢，調查基岩面地形是不可或缺的工作。
3. 在坡度、*TWI*、土壤厚度和土壤垂直硬度分布等單一因子中，以土壤厚度因子評估高崩塌潛勢區域 (PSFL) 所得的面積最小，且皆分布於崩塌位置附近，說明土壤厚度在崩塌潛勢的預測中佔有相當重要的角色。由於崩塌地並非位於 *TWI* 最大的區域，加上崩塌剖面土壤垂直方向有硬度較高的分層 (Type 2) 存在，且崩塌剖面觀測到不同質地及顏色的土壤分層，推測該崩塌受到水分垂直移動匯流的機制更甚於側向流動。這顯示土壤垂質結構的促崩機制，類似的崩塌機制亦可能發生於樣區中同類土壤垂直硬度分布的地區。

本研究於平均坡度約 40%，具有崩積土層之坡地進行調查，結果顯示樣區土壤厚度及土壤垂直結構的空間變異是解釋崩塌機制的重要因子，此結果將有助於評估類似條件坡地崩塌潛勢的區位。目前台灣對於土壤厚度或土壤垂直結構之調查或資料甚少，本研究也發現土壤厚度或土壤垂直結構難以用其他

地形因子來推估，顯示現地調查的需要。研究中所應用之簡易貫入試驗為一經濟、有效之方法，除了可以得知基岩位置，並可藉由土壤結構資訊，簡易分辨土壤水垂直滲透的樣式，對於具有較複雜條件處，再進一步進行詳細的調查或觀測。日本近年便將貫入試驗列入崩塌地調查、淺層崩塌評估之基本調查項目，無論是廣域調查、實務操作、資料庫累積皆已有成果 (內田等, 2009；田村等, 2010)。臺灣目前還無類似的調查前例，建議未來之現地調查或數值模擬應考慮上述兩因子的影響，特別臺灣之地質年代年輕、山坡地崩積土遍布，就評估臺灣坡地水文過程及坡地穩定而言，若忽視土壤厚度及土壤垂直結構之異質性，可預期評估結果將與實際狀況有很大的出入。

誌謝

本研究受國立臺灣大學實驗林管理處 101 實管 03 號及 102 實管 01 號計畫支持，部分由國家科學委員會計畫 (NSC 101-2621-M-002-027) 支持。調查期間承蒙臺灣大學實驗林管理處在調查上的協助、樣區背景資料、雨量資料的提供，特此致謝。

參考文獻

- [1] 姜壽浩、徐美玲 (2006)，「以局部穩定條件率定之邊坡土壤厚度估測模式」，地理學報, 44, 23-38。(Chiang, S.H., and Hsu, M.L. (2006). "Parameter calibration in a process-based soil depth estimation model assuming local steady state." *Journal of Geographical Science*, 44, 23-38. (in Chinese))
- [2] 陳樹群、馮智偉 (2005)，「應用 Logistic 迴歸繪製崩塌潛感圖—以濁水溪流域為例」，中華水土保持學報, 36(2), 191-201。(Chen, S.C., and Ferng, J.W. (2005). "The application of logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Jhuoshuei River basin." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 36(2), 191-201. (in Chinese))
- [3] 陳則佑、馮正一、莊育蓁 (2011)，「應用 TRIGRS 程式於邊坡破壞機率分析-以奧萬大地區為例」，中華水土保持學報, 42(3), 228-239。(Chen, T.Y., Feng, Z.Y., and Chuang, Y.C. (2011). "An application of TRIGRS on slope failure probability analyses - A case study of Aowanda." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(3), 228-239. (in Chinese))
- [4] 陳建新、陳嬪璇、譚志豪、冀樹勇、蘇泰維(2013)，「台灣西部地區降雨促崩潛勢特性分析」，中華水土保持學報, 44(2), 179-189。(Chen, C.H., Chen, Y.H., Tan, C.H., Chi, S.Y., and Su, T.W. (2013). "Characteristic analysis of rainfall-induced landslide potential in western Taiwan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(2), 179-189. (in Chinese))
- [5] 黃宏斌、徐肇斌、謝孟荃 (2006)，「石門水庫集水區崩塌地之調查研究」，農業工程學報, 52(3), 32-45。(Huang, H.P., Hsu, C.P., and Shieh, M.C. (2006). "Landslides investigation in Shihmen Reservoir watershed." *Journal of*

- Chinese Agricultural Engineering*, 52(3), 32-45. (in Chinese))
- [6] 黃景川、駱建利、朱奕璋、胡立康、李金龍、張家薰、雲世傑 (2011)，「降雨引發淺層邊坡破壞機制」，中華水土保持學報，42(3)，184-195。(Huang, C.C., Lo, C.L., Ju, Y.J., Hwu, L.K., Lee, J.L., Jang, J.S., and Chieh, Y.S. (2011). "Mechanisms of rainfall-induced shallow slope failures." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(3), 184-195. (in Chinese))
- [7] 蘇苗彬、陳毅輝、方俊傑 (2009)，「應用不安定指數法於坡地崩塌之潛勢分析」，水保技術，4(1), 9-23。(Su, M.B., Chen, I.H., and Fang, J.J. (2009). "Application of instability index method to analyze the potential of slope collapse." *Journal of Soil and Water Conservation Technology*, 4(1), 9-23. (in Chinese))
- [8] 内田太郎、盛伸行、田村圭司、寺田秀樹、瀧口茂隆、龜江幸二 (2009)，「場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響」，砂防学会誌，62(1), 23-31。(Uchida, T., Mori, N., Tamura, K., Terada, H., Takiguchi, S., and Kamee, K. (2009). "The role of data preparation on shallow landslide prediction." *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 62(1), 23-31. (in Japanese, with English abstract))
- [9] 田村圭司、内田太郎、秋山浩一、盛伸行 (2010)，「高精度空間情報を用いた表層崩壊発生危険度評価手法に関する研究」，土木研究所報告，241, 47-61。(Tamura, K., Uchida, T., Akiyama, K., Mori, N. (2010). "Research on the prediction method of shallow landslide location using high resolution spatial data." *Research Report of Public Works Research Institution*, 214, 47-61. (In Japanese, with English abstract))
- [10] Beven, K. J., and Kirkby, M. J. (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- [11] Chu, H. K., Lo, C. M., and Chang, Y. L. (2013). "Numerical analysis of slope stability at the 115.9k point of the Su-Hua Highway." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(2), 97-104.
- [12] Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C., and Spizzichino, D. (1999). "Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modelling." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(5), 443-455.
- [13] Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M. L., and Montgomery, D. R. (1995). "A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data." *Hydrological Processes*, 9(3-4), 383-400.
- [14] Freer, J., McDonnell, J. J., Beven, K. J., Peters, N. E., Burns, D. A., Hooper, R. P., Aulenbach, B., and Kendall, C. (2002). "The role of bedrock topography on subsurface storm flow." *Water Resources Research*, 38(12), 1269.
- [15] Masaoka, N., Kosugi, K., Yamakawa, Y., Mizuyama, T., and Tsutsumi, D. (2012). "Application of a combined penetrometer-moisture probe for investigating heterogeneous hydrological properties of a footslope area." *Vadose Zone Journal*, 11(2), doi:10.2136/vzj2011.0064.
- [16] Montgomery, D. R., and Dietrich, W. E. (1994). "A physically based model for the topographic control on shallow landsliding." *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- [17] Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., and Heffner, J. T. (2002). "Piezometric response in shallow bedrock at CB1: Implications for runoff generation and landsliding." *Water Resources Research*, 38(12), 1274, doi:10.1029/2002WR001429.
- [18] Okimura, T., and Tanaka, S. (1980). "Researches on soil horizon of weathered granite mountain slope and failed surface depth in a test field." (In Japanese, with English abstract.) *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, 33(1), 7-16.
- [19] Salciarini, D., Godt, J., Savage, W., Conversini, P., Baum, R., and Michael, J. (2006). "Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy." *Landslides*, 3(3), 181-194.
- [20] Tarboton, D. G. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models." *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
- [21] Yoshimatsu, H., Kawamitsu, K., Senoo, K., and Hasegawa, S. (2002). "Simplified penetrometer for surface structure survey in hillslopes." (In Japanese.) *Transaction of Japan Society of Erosion Control Engineering*, 392-393.

2013年12月03日 收稿

2014年02月17日 修正

2014年04月02日 接受

(本文開放討論至2014年12月31日)