

# 台灣低海拔森林演替早期與晚期樹種根力比較

陳蒼緯<sup>(1)</sup> 尤子豪<sup>(1)</sup> 張勵婉<sup>(2)</sup> 宋國彰<sup>(3)\*</sup> 曾玠皓<sup>(1)</sup> 李信典<sup>(1)</sup> 胡紘彥<sup>(1)</sup>  
葛千睿<sup>(1)</sup>

## 摘要

森林對邊坡淺層土壤的穩定往往決定於樹木根力。森林地區發生崩塌後，會先出現的是演替早期樹種，之後被演替晚期樹種所取代。本研究的目的是要確定，演替晚期樹種的單根抗拉力及根系加勁力是否會高於早期的。研究地點在常崩塌的南投縣蓮華池實驗林。取樣了當地三種優勢的演替早期(白柏、白匏子與鵝掌柴)與另三種晚期樹種(厚殼桂、茜草樹與黃杞)，在目標樹木樹幹旁約 1 m 處，挖掘土壤剖面，進行側向根系單根拉拔試驗。以根束韋伯模型來估算不同根徑的單根抗拉力後，再推算出根系加勁力。結果顯示，不論是單根抗拉力或整個根系加勁力，演替晚期樹種都有高於早期樹種的趨勢。再加上，對邊坡淺層土壤穩定有正面效應的兩個重要因子(植物社會之密度與胸徑)會隨著演替而增加，因此當演替往晚期推進時，植生穩定邊坡淺層土壤的作用應該會提高。在台灣，對於邊坡植生的管理，應該是讓演替自然地往晚期推進，甚至可以人為介入以促進演替。

(**關鍵詞**：崩塌、根束韋伯模型、根系加勁力、單根抗拉力、植生演替)

## Root strength comparisons between early and late successional trees in a lowland forest of Taiwan

*Cang-Wei Chen*<sup>(1)</sup> *Tzu-Hao Yu*<sup>(1)</sup> *Li-Wan Chang*<sup>(2)</sup> *Guo-Zhang M. Song*<sup>(3)\*</sup>  
*Jie-Hao Tseng*<sup>(1)</sup> *Hsin-Tien Li*<sup>(1)</sup> *Hung-Yen Hu*<sup>(1)</sup> *Chien-Jui Ko*<sup>(1)</sup>

Master student<sup>(1)</sup>, assistant professor<sup>(3)</sup>, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

Associate researcher<sup>(2)</sup>, Taiwan Forestry Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan

## ABSTRACT

Slope stability of shallow soils in forested areas is often determined by tree root strength. After landslides, the early successional species emerge first, then will be taken over by the late successional species.

<sup>(1)</sup> 國立中興大學水土保持學系 研究生

<sup>(2)</sup> 國立中興大學水土保持學系 助理教授 (通訊作者 email: mikesong@nchu.edu.tw)

<sup>(3)</sup> 行政院農業委員會林業試驗所 助理研究員

The present study aimed to examine whether single-root pullout resistance and root reinforcement decrease as tree species change along with the succession sequence. The study site is in the Lienhuachi Experimental Forest in central Taiwan, where landslides happen frequently. Three dominant early (*Mallotus paniculatus*, *Sapium discolor*, and *Schefflera octophylla*) and three late successional species (*Cryptocarya chinensis*, *Randia cochinchinensis*, and *Engelhardtia roxburghiana*) were sampled. Soil profiles were dug somewhere approximately 1 m to the trunks of target trees to conduct the single-root-pull-out tests. Single-root pullout resistance which varies with root diameters was estimated with the Root Bundle Model with the root-failure Weibull survival function (RBMw) and then root reinforcement was estimated. Results showed a tendency that, in terms of single-root pullout resistance and root reinforcement, the late successional species were higher than the early successional species. Moreover, two important factors (stem density and diameter at breast height) which have positive effects on slope stability increase as succession proceeds. As a result, slope stability effects of vegetation should also increase. In Taiwan, in terms of the vegetation management for slopes, we should allow vegetation succession to proceed naturally or even promote succession with human-aided approaches.

**(Keyword:** landslide, Root Bundle Model Weibull, root reinforcement, single-root pullout resistance, vegetation succession)

## 前言

台灣每年有諸多土砂災害發生。由於處於太平洋生成颱風的路徑，加上滯留鋒導致的梅雨季節，雨量豐沛，常有降雨型崩塌。位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界的地層活動頻繁處，常受到地震災害的影響。因這些氣候地質特性，台灣容易發生山崩、土石流等災害。

森林是影響淺層崩塌發生的重要因子之一。植生主要透過三種效應影響淺層土壤的穩定。第一種為水文調節效應。樹木可以透過樹冠截留降雨、根系增加入滲率與蒸散作用加速土壤的乾燥等，改變淺層土壤的水分含量 (Forbes & Broadhead, 2013; Sidle &

Bogaard, 2016)，進而影響淺層崩塌發生的機率 (Coppin & Richards, 1990)。第二種是植被本身荷重所造成的。因為草類重量甚小，植生的整體的荷重效應可視為全來自於樹木。對於淺層崩塌發生，荷重是正或負面效應，主要決定於坡面的地質條件、植生分布狀況以及土壤本身的性質。例如，上坡面的植生荷重會減少土體的穩定性，而下坡面的荷重則有助於土體安定性 (Coppin & Richards, 1990)。第三種是透過樹木根系對於土壤的加勁力 (root reinforcement) (Stokes et al., 2009; Ghestem et al., 2011)。這也是學者認為植生對邊坡淺層土壤穩定的關鍵因子 (Schmidt et al., 2001; Docker & Hubble, 2008; Schwarz et al., 2010a)。整體而言，森林覆蓋會對邊坡的淺層土壤穩定會有些許的負面效應。但是比起沒有森林

的邊坡，前者的安全係數有(factor of safety)往往還是比後者高(Kokutse et al., 2006; Fan & Lai, 2014)。

國外研究顯示，因樹木根系的影響，山區森林可以防治淺層滑坡、泥石流、崩塌等自然災害(Dorren et al., 2004; Dupire et al., 2016; Vacchiano et al., 2016)。塚本良則(1987)調查了森林植被和邊坡淺層土壤滑動發生率的關係後發現，砍伐後，新植栽樹木根系要達到原本樹木根系相同程度的加勁力約要20年。代表新根系長成前，砍伐後的森林在20年內發生邊坡淺層土壤滑動機率偏高，也意味著土層內根系發展狀況與邊坡淺層土壤滑動機率有著相當的關係。吳正雄(1993)研究根系對崩塌地的影響發現，就台灣赤楊(*Alnus formosana*)及山黃麻(*Trema orientalis*)純林而言，有林地淺層土壤的剪力強度較無林地的多了150~730 kg/cm<sup>2</sup>的，有效提高16%~35%的安全係數值，進而降低淺層崩塌的發生機率。

淺層崩塌的發生主要決定於土壤剪力強度、摩擦角、坡度以及滑動面深度(De Blasio, 2011)。而樹木根系與土壤的交互作用能提高土壤剪力強度，進而增加邊坡淺層土壤的穩定性(Schmidt et al., 2001; Reubens et al., 2007; Stokes et al., 2009)。

Schwarz 等人(2010)發展一套根系力學模型名為根束模型 Root Bundle Model(RBM)。此模型透過計算單根抗拉力及位移，來計算土壤斷面之根系加勁力。與 Wu 模型(Wu et al., 1979)及 FBM (fiber bundle model)模型(Pollen & Simon, 2005)相較下，此模型優點是納入了兩種根系受到拉力時的實際狀況。一是根不

會同一時間斷裂，二是根的抗拉力會因根被拉動時所造成位移而變。Schwarz 等人在2011年發現，RBM 模型模擬出來的力會高於實際測量到的。因此 Schwarz 等人在2013年將 RBM 模型加入 Weibull 生存函數(新模型為 Root Bundle Model Weibull function (RBMw))，讓模擬出的數據更接近真實的。

RBMw 模型假設所有的根樣本都是線性彈性纖維，而且會在拉長(位移)某一程度後斷裂。根平均拉伸長度 $L_{aver}$ 、根平均最大抗拉力 $F_{max}$ 、根平均彈簧力常數 $k$ 皆為根直徑的冪函數：

$$L_{aver}(D) = L_0(D)^\alpha, \quad (1)$$

$$F_{max}(D) = F_0(D)^\beta, \quad (2)$$

$$k(D) = k_0(D)^\gamma, \quad (3)$$

其中  $L_0$ 、 $F_0$ 和 $k_0$ 為縮放係數， $\alpha$ 、 $\beta$ 與 $\gamma$ 為冪函數之係數，一般 $\gamma$ 假設為1。

由於在野外調查實驗的根系生長方式與環境不同，以至於現地拉拔試驗的值遠低於實驗室拉拔試驗，故將該模型之平均彈簧力常數去乘上還原係數 $\tau$  (Schwarz et al., 2010b)：

$$k(D) = \tau k_0(D), \quad (4)$$

其中 $\tau$ 值範圍介於0.3~0.5之間。

### 1.單根抗拉力

結合上述等式(1)~(4)和彈簧力常數公式 $k = F/\Delta x$ ，單根抗拉力 $F$ 作為位移 $\Delta x$ 的函數為

$$F(D, \Delta x) = k_0(D)\Delta x; F(D, \Delta x) < F_{max}(D) \quad (5)$$

其中  $\Delta x$  為從拉拔試驗過程中所收集的單根位移。根在斷裂前最大的估計位移  $\Delta x_{max}$  則可以從由公式(2)和(5)衍生出的公式(6)而得到。

$$\Delta x_{max}(D) = F_0(D)^\beta / k_0(D) \quad (6)$$

## 2. Weibull 生存函數

Weibull 函數是廣泛應用於統計的機率密度函數。此函數原本是針對材料疲勞的所發展的(Weibull, 1939)，而在生物學可用來推估生物在時間軸(年齡)上的生存變化(Pinder et al., 1978)，故又名 Weibull 生存函數。在 RBMw 模型中，Weibull 生存函數是用來評估根本身的機械性質(木質部與纖維素含量、含水量、木材結構缺陷、纖維排列方式等)對根斷裂機率的影響(Dazio et al., 2018)。通常函數中的  $\omega$  越大，代表根內部的機械性質變化越小，根斷裂方式趨近於同時斷裂，導致數據高峯值較高。但使用較低的  $\omega$  時，力的高峯值趨緩，曲線變較趨緩，代表根系內部機械性值變化較大(Dias et al., 2017)。

在本研究所用 RBMw 模型，是此函數模擬出標準化位移  $\Delta x^*$  下，尚未斷裂的根比例。

Weibull 生存函數為

$$S(\Delta x^*) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta x^*}{\lambda^*}\right)^\omega\right], \quad (7)$$

其中  $\omega$  為 Weibull 函數指數，而  $\lambda^*$  是縮放係數。此兩係數可以透過拉拔試驗來進行校準。而標準化位移  $\Delta x^*$  由公式(8)求得。

$$\Delta x^*(D) = \frac{\Delta x}{\Delta x_{max}(D)}, \quad (8)$$

其中  $\Delta x$  為實驗所收集的實際位移值， $\Delta x_{max}$  為模型估計出來的位移值。

## 3. 根系加勁力

整體根系的加勁力  $F_{tot}(\Delta x)$  是每條單根的抗拉力與 Weibull 生存函數  $S$  相乘，加總後而得。

$$F_{tot}(\Delta x) = \sum_{i=1}^N F(D_i, \Delta x) S(\Delta x_i^*), \quad (9)$$

其中  $N$  是試驗的總根數。

植生演替可以改變邊坡淺層土壤穩定的程度(Osman & Barakbah, 2011)。植生演替是植物群落物種與結構隨著時間而改變的現象(劉棠瑞 & 蘇鴻傑, 1983)。當一地區的植生因天然(崩塌)或人為(砍伐)干擾而被移除後，陸續會有不同物種在這地區出現，發生明顯的演替現象。在演替早期，出現在空地的物種大多為喜歡陽光且生長快速的樹種，也就是陽性樹種。但因後續植物密度漸增，林下轉為陰暗，只有耐陰樹種的小苗得以生存，導致在演替晚期，陽性樹種逐漸被取代耐陰樹種。Osman 與 Barakbah (2011)在東南亞的研究發現，植生的生物量、生物多樣性與根長密度(root length density)會隨著演替而增加，最終導致邊坡淺層土壤穩定的增加。而歐洲地區的研究發現，當地演替早期樹種的根力高於晚期的(Massimiliano Schwarz, 個人通信)。換句話說，植生對坡地的穩定作用會隨演替而降低。因此以預防崩塌發生的角度來說，在歐洲地區反而要阻止演替往晚期推進(Massimiliano Schwarz, 個人通信)。

在台灣，不論崩塌發生後是否有人為治理，時間久了，終究會發生自然演替(邱清安 et al., 2016)。但目前為止，尚未有研究探究淺層崩塌發生機率是否會隨植生演替而改變。若台灣演替早期到晚期樹種根力的變化趨勢與歐洲地區的相同，也就是演替晚期樹種的根力低於早期的，淺層崩塌發生機率會隨植

生演替而增加。本研究地點在一個曾經發生淺層崩塌的台灣天然闊葉林。以現地拉拔單根方式測量演替早期與晚期各3種樹種的單根抗拉力，再以 RBMw 模型來模擬出這些樹種根系對於土壤的加勁力。我們希望透過這研究，探究植生對邊坡淺層土壤的穩定作用是否會隨演替而減弱。

## 研究方法

研究地點在蓮華池實驗林 (23° 54' 49" N, 120° 52' 43" E)，總面積為460公頃，海拔高度為576-925公尺，平均坡度為35.3°。年平均氣溫為20.8°C，7月平均最高氣溫25.2°C，1月平均最低氣溫14.8°C；相對溼度平均為87.1%；年總雨量為2285.0mm。雨季多集中在5月至9月，為全年總降雨量89.6%；每年6月為降雨量最高峰，平均為482.7mm；11月份降雨最少，平均只有24.4mm。

地質與土壤部分，蓮華池試驗林全區地質屬於第三紀始新世至漸新世之白冷層。主要為厚層石英岩質砂岩與長石質砂岩，間夾薄層硬頁岩互層，部分砂岩為粗粒至小礫，頂部夾薄煤層。土壤則可分為正淡瘠弱育土 (Typic Dystrochrept) 以及正簡極育土 (Typic Hapludult) 兩類(行政院農委會林業試驗所，2012)。

本樣區植生類型屬於天然闊葉林。根據2008年的蓮華池25公頃動態樣區的每木調查，樣區內有木本植物144種，88屬，46科(行政院農委會林業試驗所，2012)。最優勢的五個科為殼斗科、樟科、茜草科、大戟科及野牡丹科。

由於樣區內地形陡峭，平均坡度為35.3°，每隔幾年會發生崩塌。2008年發生就發生多處崩塌，總面積為9159.47 m<sup>2</sup>(張勵婉 et al., 2017)。也因此是研究天然闊葉林與崩塌關係之合適地點。

### 1. 樹種選擇

本研究中都是針對樣區內重要值指數 (important value index, IVD) 前20名的樹種進行取樣。除了本研究所測量的三種樹種(白柏、白匏子、黃杞)外，也包含了尤子豪(2018)所測量的三種樹種(鵝掌柴、厚殼桂、茜草樹)。其中。這六種樹種中，演替早期與晚期樹種各占一半(表1)。

### 2. 歷年根抗拉力之測量方法

根系穩定邊坡淺層土壤的研究中，最關鍵的就是植物根系抗拉力強度的數據蒐集，而蒐集方式可概分為室外試驗與室內試驗。以下是目前常用的四種方法，以及對於本研究適用性的比較(表2)。

(1) 實驗室儀器拉拔試驗：將野外植被的根剪下，帶回研究室後，利用萬能材料試驗機，將採集之單根夾在兩側後，拉拔直到斷裂為止 (Mattia et al., 2005；林德貴 et al., 2010)。實驗室中所獲得的根抗拉力往往高於野外試驗的。可能原因為：一、實驗室所用拉拔的根往往是直線型樣本，然而天然根系大多是彎曲生長。二、實驗室試驗是把根樣本拉斷，無法納入根系與土壤間的交互作用(Tosi, 2007；Vergani et al., 2016；Giadrossich et al., 2019)。故野外試驗比起室內試驗更能測量出根之實際狀況。

表1 六種目標樹種的重要特性(行政院農委會林業試驗所，2012)。IVI，重要值指數 (importance value index)。

Table 1 Important properties for the six target tree species (Taiwan forestry research institute，2012).

IVI, importance value index.								
樹種	學名	演替 階段	相對胸 高截面 積 (%)	相對密 度(%)	IVI	IVI 排名	平均胸 徑(cm)	總根系 加勁力 (比值)
白匏子	<i>Mallotus paniculatus</i>	早	3.49	2.48	2.98	10	6.40	1.3
鵝掌柴	<i>Schefflera octophylla</i>	早	7.23	3.58	5.41	3	7.34	8.1
白柏	<i>Sapium discolor</i>	早	2.80	0.77	1.78	20	10.05	1.0
黃杞	<i>Engelhardtia roxburghiana</i>	晚	8.12	1.15	4.63	5	12.45	2.8
茜草樹	<i>Randia cochinchinensis</i>	晚	3.10	13.75	8.43	1	2.88	4.8
厚殼桂	<i>Cryptocarya chinensis</i>	晚	6.10	4.53	5.31	4	5.16	9.8

(2) 現地直剪試驗：分別對含根及未含根土壤，以平行地表方向的剪力，加以破壞後，測量抗剪力。這兩者抗剪力的差距，即為根系之加勁力(Docker & Hubble, 2008； Fan & Su, 2009)。由於這方法對材料的破壞方向最接近邊坡淺層土壤滑動所造成的，是這四種方法中，最能準確測量根系加勁力的方法。但這方法會造成樹木的死亡，再加上儀器過重，無法在離道路太遠的地區進行試驗，因此本研究不採用。

(3) 整株拉拔試驗：此法是將樹木的樹冠移除，並且用往上或側向的拉力，將整棵樹木的根系拔起，以測量根系加勁力(賴俊帆, 2007；林德貴 et al., 2016)。因為破壞材料的方向與邊坡淺層土壤滑動方向不同，加上會造成樹

木的死亡，故不採用。

(4) 單根拉拔試驗：此法會在距目標樹木樹幹一定距離內挖一垂直土壤剖面，並拉拔剖面上某單一側根，直到根斷裂或被抽出後，測量出單根的抗拉力(Schwarz et al., 2010b； 尤子豪, 2018)。比起實驗室儀器拉拔單根及整株拔出的方法，單根拉拔方法更能仔細研究不同根徑變化之單根抗拉力。不少文獻也提到側向根系分布對於邊坡淺層土壤穩定的重要性(Reneau & Dietrich, 1987； Schmidt et al., 2001； Casadei et al., 2003； Roering et al., 2003； Schwarz et al., 2010b)。加上部分樹木分布的地區，只能步行到達。因此我們選擇使用這個儀器可以人員背負攜帶，且不會造成樹木死亡的方法。

表2 根力測量方法比較(尤子豪, 2018)

Table 2 Method comparisons for root strength measurement (Yu, 2018)

比較項目	根力測量方法			
	萬能材料拉拔機試驗	現地直剪試驗	整株拉拔試驗	單根拉拔試驗
試驗地點	實驗室	現地	現地	現地
儀器是否可人員背負攜帶	否	否	否	是
取樣樹木是否存活	存活	死亡	死亡	存活

### 3.土壤剖面挖掘

本研究根據尤子豪(2018)與 Zydroń 等人 (2019)的方法,在距離目標樹木樹幹80-150 cm 處,挖掘長80 cm、寬40 cm、深40 cm 之土壤剖面。土壤剖面挖掘前,會先確定有足夠空間可以架設儀器。為了降低挖掘過程對根系的破壞,以螺絲起子代替鏟子,先挖鬆土壤,再徒手將土壤移出土壤剖面。

### 4.單根拉拔試驗

每個樹種取樣至少50支單根。本研究進行單根拉拔試驗過程中,會以 S 型荷重計來測量單根抗拉力,以位移計測量根的位移。資料紀錄器會將這些測得之數據,以每秒5次的頻率紀錄下來。所有相關儀器如下,圖1則是架設時空間配置。

- (1) S 型荷重計(HMD1005-2000 kg, Yuyao Tongyong Meter, China) +9V 電池
- (2) 位移計(HPS-M1-20-10V-2 m, Hontko, Taiwan) +9V 電池
- (3) 資料紀錄器 (MCR-4V, T&D, Japan)+9V 電池
- (4) 電動絞盤(W08-5060, 至光工具)+12 V

電池

- (5) 金屬框架(長:63 cm, 寬18.5 cm, 高29 cm)
- (6) 固定繩索

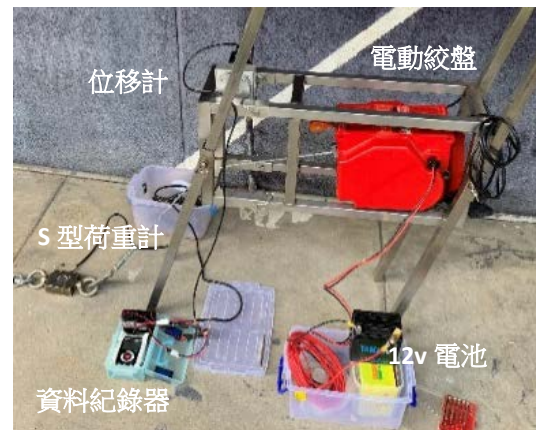


圖1 單根拉拔試驗儀器

Figure 1 Instrument for single-root pullout tests

整個操作步驟如下。在面向目標樹木樹幹的那個土壤剖面上,選定了要拉拔的根後,先用細鐵絲將根與不鏽鋼牙棒網緊。網緊過程中盡量先將樹皮去除,以避免在拉拔過程中不鏽鋼牙棒從根脫落。金屬框架組裝好,並就定位後,安裝上電動絞盤與位移計。綁了根的不鏽鋼牙棒的另一端鉤上位移計與 S 型荷重計。S 型荷重計的另一頭鉤住電動

絞盤，也就是荷重計是置於不鏽鋼牙棒與電動絞盤之間。必要時會重新調整金屬框架的擺放位置，以確保不鏽鋼牙棒、S型荷重計與電動絞盤能排成一直線。為了防止金屬框架在實驗過程中被移動，造成位移數據的誤差，會以繩索將金屬框架栓到後方的樹幹上。在啟動電動絞盤前，會先確認資料紀錄器已能正常讀取並記錄位移計與S型荷重計之數據，並確認後三者儀器的電池電壓都足夠。資料紀錄器開始紀錄數據後，開啟電動絞盤，直到根樣本斷裂或滑出土壤，才會依序關閉電動絞盤及資料紀錄器。最後紀錄根樣本的相關數據，如網綁處根徑、斷裂處根徑、網綁至斷裂處的距離、分支根數等等，並且拍照記錄下來。到研究室後，透過RBMw模型進行數據分析及模擬。

## 結果與討論

### 1. 單根特性比較

六種樹種的根彈簧力常數，由大而小排序為厚殼桂、白柏、黃杞、茜草樹、白匏子與鵝掌柴(圖2a, 表3)；在這前三名之中，演替晚期樹種就佔了兩名。當把同一演替階段樹種的數據予以合併後，所分析出的根彈簧力常數也顯示，演替晚期樹種是高於演替早期的(圖2d, 表3)。材料的彈簧力常數越高，表示其延展性越低，越接近剛體(Ugural & Fenster, 2003)。整體而言，演替晚期樹種根的延展性是低於演替早期的。

根越有延展性的樹種越不適合用在邊坡淺層土壤穩定。當不穩定的土體往下坡處移動時，如果根的延展性過高，既使根抗拉力大到可以維持根不至於斷裂，而阻止邊坡

繼續往下滑，但稍稍往下移動的土體與上坡處穩定的土體間，會出現張力裂隙。這類裂隙出現之後，可讓地表徑流大量入滲，增加崩塌的可能性(林昭遠 & 藍欣茹, 2015)。因此單以根延展性來看，厚殼桂是比其他五個樹種更能穩定邊坡淺層土壤(圖2a)，而演替晚期樹種的穩定效果是優於演替早期的(圖2d)。

根徑較小( $4\text{ mm} < D < 5.5\text{ mm}$ )時，單根抗拉力最大樹種為黃杞，其他由大而小依序為鵝掌柴、茜草樹、厚殼桂、白柏及白匏子(圖2b, 表3)；在這之中，三種演替晚期的樹種(黃杞、茜草樹、厚殼桂)各排名在第1、3與4。根徑較大( $D > 27\text{ mm}$ )時，單根抗拉力由大而小排序為厚殼桂、茜草樹、白柏、黃杞、白匏子與鵝掌柴(圖2b, 表3)；比較大根徑的單根抗拉力，三種演替晚期樹種(厚殼桂、茜草樹、黃杞)彼此的大小順序雖不同小根徑的，但在整個6個樹種的排名，也是在第1、2與4。以整體趨勢來看，演替晚期樹種的單根抗拉力是高於演替早期的。當把同一演替階段樹種的數據予以合併後，所分析出的單根抗拉力也顯示，演替晚期樹種是高於演替早期的(圖2e)。

樹木對邊坡淺層土壤穩定作用是透過整個根系的加勁力。影響根系加勁力的因子除了單根抗拉力，還有根面積比(root area ratio, RAR)、樹木的胸徑及植物密度。如果這六種樹種的根面積比、樹木的胸徑及植物密度都相同，在演替晚期樹種的單根抗拉力高於演替早期的情況下(圖2e)，前者是更能穩定邊坡的淺層土壤。

Weibull 生存曲線中，標準化位移從0到2間，厚殼桂與鵝掌柴的曲線下滑最為劇



烈，而白柏與白匏子曲線的下滑最為輕微(圖2c)。在這 RBMw 模型中，Weibull 生存函數是用來推估，單根被拉扯某一段距離時(位移)，可以生存(不被拉斷)的機率。相同的位移下，曲線下滑越劇烈，表示根在被拉扯的過程中，斷裂的機率越高。因此，標準化位移2時，厚殼桂與鵝掌柴的根被拉斷的機率是高於白柏與白匏子的(圖2c)。當把同一演替階段樹種的數據予以合併後，所分析出的生存函數顯示，演替早晚期兩群樹種間的曲線幾乎完全重疊在一起(圖2f)。因此生存

函數不太可能是影響演替早晚期兩群樹種根系加勁力的重要因子。

## 2.根系特性

在現地距離目標樹木80至150cm 的土壤剖面所收集到的根面積比數據，加上上面所建立的單根抗拉力公式，算出每個土壤剖面中的根面積比與根系的加勁力。然後對胸徑、根面積比與根系加勁力三者的進行迴歸分析。

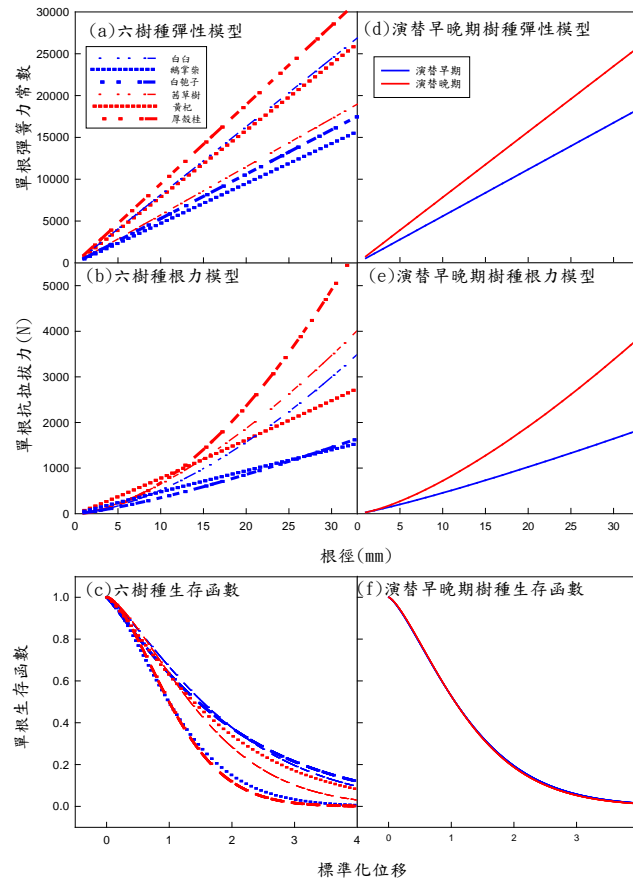


圖2 六種目標樹種與演替早晚期樹種單根特性模型

Figure 2 Models for single-root characteristics of the six target tree species, and early and late successional-staged cohorts

根面積比與根系加勁力的迴歸分析顯示，兩者間是正相關的線性關係(圖 3a、3d、表 4)。六種樹種的迴歸公式斜率由高而低為茜草樹、黃杞、厚殼桂、白柏、鵝掌柴及白匏子(圖 3a，表 4)，而且這排名的前三名都是演替晚期樹種。也就是說，根面積比增加下所伴隨的根系加勁力上升幅度，以茜草樹最高，而且演替晚期樹種也高於演替早期樹種。

胸徑與根面積比，以及胸徑與根系加勁力這兩組都是乘幕的迴歸關係(圖 3b、3e，表 4)。在表 4 中，胸徑與根系加勁力迴歸公式的次方越高，表示當目標樹木的胸徑增加時，而伴隨的根系加勁力增加幅度越高。在六種樹種中，以黃杞增加幅度最低，而且是唯一公式次方數小於 1 的樹種(表 4)。

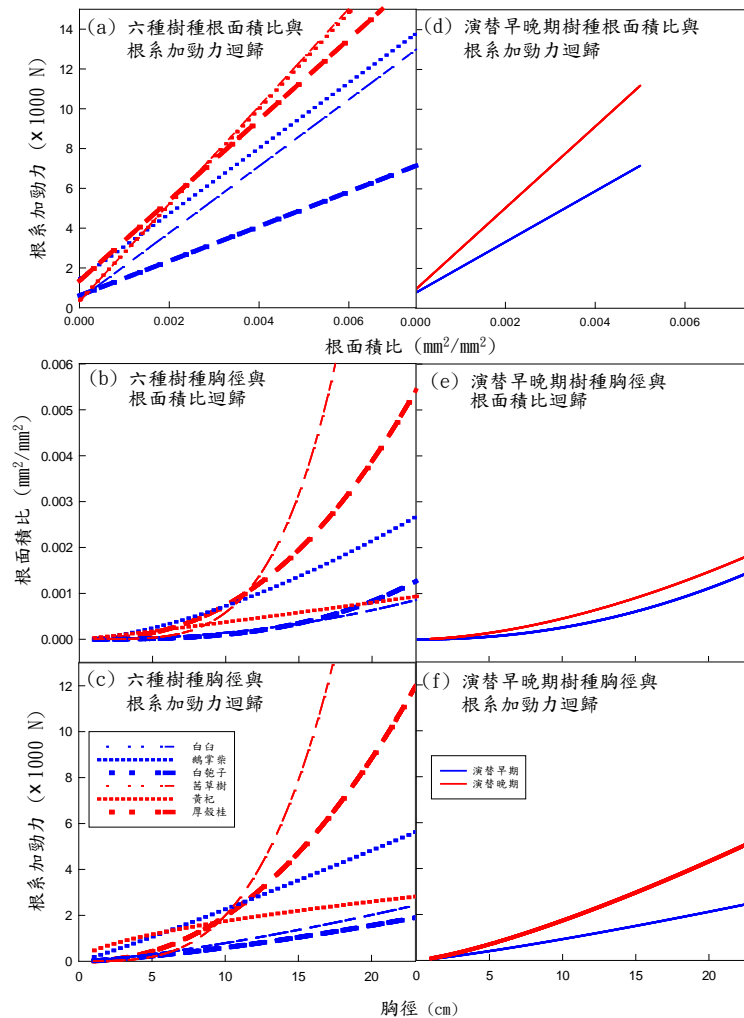


圖 3 六種目標樹種與演替早晚期樹種根系特性迴歸模型

Figure 3 Regression models for root system characteristics of the six target tree species, and early and late successional-staged cohorts

決定樹木根系加勁力大小的因子，除了其單根抗拉力及根面積比外，還有這棵樹的胸徑(圖3c)。而影響某樹種族群在某邊坡淺層土壤的根系加勁力高低的，除了上述三個因子外，還有此樹種在邊坡上植株密度(單位面積有幾棵樹)。所以我們以25ha 蓮華池森林動態樣區在2008年所作的每木調查結果(有整個樣區內每棵樹的胸徑及植株密度)，加上胸徑與根系加勁力的迴歸式，算出六個樹種的每棵樹在這樣區內所提供的根系加勁力，再把同一樹種的根系加勁力加總，來探究這些樹種為整個樣區所提供的根系加勁力。由於表4的迴歸式都是依據，一個個距離樹幹約1 m 處的80cm 長與40 cm 深土壤剖面上所收集的數據所建立，所以上述方法所推算出的是某個土壤剖面的根系加勁力，這其實是遠低於實際樹木可提供的根系加勁力。然而上述方法應該仍可顯示出各物種間總根系加勁力的實際比值。因此表1只顯示六種樹種總根系加勁力的比值而不是絕對值。

樹木的數量(植株密度)與樹幹大小(胸徑)是決定某樹種族群在一個地區總根系加勁力的重要因子。六種樹種總根系加勁力由大而小排序為厚殼桂、鵝掌柴、茜草樹、黃杞、白匏子與白柏(表1)。厚殼桂在樣區內的植株相對密度高(4.54%，六種中排名第二)(表1)，加上粗根徑( $D>27$  mm)的單根抗拉力最高(圖2a)，雖然平均胸徑是排名第五，其總根系加勁力仍能排名第一。鵝掌柴雖然粗根徑單根抗拉力排在最後(圖2a)，但平均胸徑(排名第三)與植株相對密度都高(排名第

三)(表1)，因此總根系加勁力得以排名第二。茜草樹是這六種樹種中，平均胸徑最小的(表1)，但有13.75%(也就是每100棵樹木中，將近14棵是茜草樹)的極高植株相對密度，加上單根抗拉力是六種中的第二名，因此總根系加勁力仍能排到第三名。平均胸徑排名第一的黃杞(表1)，因在較大根徑的其單根抗拉力是六種中的第四名(圖2a)，加上相對密度低(排名第五)，總根系加勁力只能排到第四名。白柏的粗根徑單根抗拉力中排名第三，而且平均胸徑排名第二，但相對密度最低，導致總根系加勁力排在最後一名。

本研究顯示演替早期樹種的根系加勁力有低於演替晚期的趨勢(圖3，表1)。雖然本研究只能在眾多樹種中，對演替早晚期樹種各取樣僅3種，但前面的討論顯示，樹木的植物社會之密度與胸徑也是決定某樹種在一個地區總根系加勁力的重要因子。以整個木本植物社會的植株密度與平均胸徑而言，演替晚期階段是高於早期的(劉棠瑞 & 蘇鴻傑，1983)，所以當演替往晚期推進時，整個植生根系對於邊坡淺層土壤穩定作用應該不至於會隨之降低。因此在台灣，以穩定邊坡淺層土壤的角度來看，應該讓植生演替往晚期發展，不論是人為介入或自然發生情況下。

## 結論

1. 本研究目的是探究演替早期(白柏、白匏子與鵝掌柴)與演替晚期樹種(厚殼桂、茜草樹與黃杞)的根力的差異，以了解植生對於邊坡淺層土壤穩定的效應是否隨植生演替

而降低。以單根抗拉力而言，在根徑較細時候(4 mm < D < 5.5 mm)時，由大而小依序為黃杞、鵝掌柴、茜草樹、厚殼桂、白柏及白匏子。根徑較大時 (D > 27mm)，由大而小排序則為厚殼桂、茜草樹、白柏、黃杞、白匏子與鵝掌柴。

2. 以單根彈簧力常數而言，由大而小排序為厚殼桂、白柏、黃杞、茜草樹、白匏子與鵝掌柴。因此此六種樹種中，以鵝掌柴的延展性最高，而厚殼桂則為最接近剛體的樹種。

3. 由 Weibull 生存函數分析可知，單根在被拉扯的過程中斷裂的機率，以厚殼桂與鵝掌柴兩者最高，而白柏與白匏子兩者最低。

4. 將六種樹種以演替早晚期分類並綜合分

析的結果顯示，演替早期樹種的單根彈簧力常數與單根抗拉力都低於晚期的，但兩者的 Weibull 生存曲線幾乎是重疊的。

5. 以根系加勁力隨胸徑而提高的幅度而言，由大而小依序為茜草樹、黃杞、厚殼桂、白柏、鵝掌柴及白匏子。

6. 除了單根抗拉力外，樹木的數量與樹幹大小也是決定樹種在某地區總根系加勁力的重要因子。

7. 單根與根系特性的分析都顯示，演替晚期樹種對於邊坡淺層土壤穩定效應有高於演替早期樹種的趨勢。加上樹木的數量與樹幹大小會隨演替而增加，讓植生演替由早期往晚期推進是有助於邊坡淺層土壤穩定的。

表3 單根相關模型

Table 3 Models for single roots

樹種	根力模型 $F_{max}$ [N], $D$ [mm]	彈性模型 $D$ [mm]	生存函數模型
白匏子	$F_{max}=17.7 D^{1.30}$	$k = 530.81 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{2.03})^{1.11}]$
演替早期 白柏	$F_{max}=13.04 D^{1.60}$	$k = 814.88 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{2.04})^{1.27}]$
鵝掌柴	$F_{max}=50.84 D^{0.98}$	$k = 477.02 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{1.27})^{1.43}]$
三種樹種綜合	$F_{max}=31.05 D^{1.17}$	$k = 558.47 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{1.38})^{1.39}]$
黃杞	$F_{max}=68.86 D^{1.05}$	$k = 795.12 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{1.87})^{1.21}]$
演替晚期 厚殼桂	$F_{max}=10.62 D^{1.80}$	$k = 946.31 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{1.25})^{1.62}]$
茜草樹	$F_{max}=19.49 D^{1.52}$	$k = 575.15 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{1.71})^{1.47}]$

陳蒼緯、宋國彰、尤子豪、張勵婉、曾玠皓、李信典、胡紘彥、葛千睿：  
台灣低海拔森林演替早期與晚期樹種根力比較

三種樹種綜合		$F_{max}=28.27 D^{1.41}$	$k = 783.83 D$	$S(\Delta x^*) = \exp[-(\frac{\Delta x^*}{1.39})^{1.36}]$
樹種	根面積比(X) [mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> ] 與根系加勁力迴歸(Y) [x1000 N]	胸徑(X) [cm]與根面積比 (Y) [mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> ]迴歸 <sup>2</sup>	胸徑(X) [cm]與根系加 勁力迴歸(Y) [x1000 N]	
演替早期	白匏子	$Y=869.57 X+0.62$ $R^2=0.60$	$Y=1.50e-7 X^{3.02}$ $R^2=0.39$	$Y=23.36 X^{1.40}$ $R^2=0.16$
	白柏	$Y=1674.00 X +0.43$ $R^2=0.79$	$Y=1.34e-6 X^{2.15}$ $R^2=0.74$	$Y=34.84 X^{1.35}$ $R^2=0.67$
	鵝掌柴	$Y=1645.40 X +1.46$ $R^2=0.91$	$Y=1.62e-5 X^{1.56}$ $R^2=0.36$	$Y=183.45 X^{1.09}$ $R^2=0.51$
	三種樹種綜合	$Y=1276.60 X +0.79$ $R^2=0.57$	$Y=2.00e-6 X^{2.11}$ $R^2=0.37$	$Y=59.11 X^{1.19}$ $R^2=0.19$
演替晚期	黃杞	$Y=2411.70 X +0.39$ $R^2=0.97$	$Y=2.75e-5 X^{1.10}$ $R^2=0.50$	$Y=459.34 X^{0.58}$ $R^2=0.32$
	厚殼桂	$Y=2024.10 X +1.36$ $R^2=0.99$	$Y=2.63e-6 X^{2.39}$ $R^2=0.67$	$Y=13.06 X^{2.17}$ $R^2=0.69$
	茜草樹	$Y=2451.00 X +0.33$ '' $R^2=0.89$	$Y=4.00e-8 X^{4.17}$ $R^2=0.75$	$Y=0.79 X^{3.40}$ $R^2=0.68$
	三種樹種綜合	$Y=2047.00 X +0.95$ $R^2=0.99$	$Y=9.31e-6 X^{1.70}$ $R^2=0.51$	$Y=84.20 X^{1.31}$ $R^2=0.44$

表4 根系迴歸公式

Table 4 Regression models for root systems

### 參考文獻

1. 尤子豪(2018)。「取樣數及是否取樣到粗根對於根束韋伯模型表現之影響」，中興大學水土保持學系所學位論文：第 1-86 頁。
2. 行政院農委會林業試驗所(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」，行政院農委會林業試驗所。
3. 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，第四十七卷，第一期，第 1287-96 頁。
4. 林德貴，王勝賢，陳威翔 & 鄒瑞卿(2016)。「水土保持常用植物山芙蓉，九芎及山黃麻土/根系統之拉拔抗力及剪力強度增量之比較」，中華水土保持學報，第四十七卷，第二期，第 84-94 頁。
5. 林德貴，黃伯舜 & 王勝賢(2010)。「山黃麻根系對土/根系統剪力強度之提升效果研究」，水土保持學報，第四十二卷，第四期，第 409-22 頁。

6. 邱清安 · 徐憲生 · 林信輝 & 陳韋志 (2016) · 「崩塌地植生重建之軌跡與目標: 復育生態學觀點下的提議」 · 中華水土保持學報 · 第四十七卷 · 第二期 · 第 104-10 頁。
7. 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」 · 臺灣林業科學 · 第三十二卷 · 第一期 · 第 1-14 頁。
8. 劉棠瑞 & 蘇鴻傑(1983) · 「森林植物生態學」 · 台灣商務印書館。
9. 賴俊帆(2007) · 「桂竹根系拉拔試驗及其坡面之穩定性評估」 · 中興大學水土保持學系所學位論文: 第 1-88 頁。
10. Casadei, M., W. Dietrich and N. Miller (2003), Controls on shallow landslide size, In: Rickenmann D and Chen C-L, editors. Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction, and assessment, Millpress, Rotterdam, Netherlands.
11. Coppin, N.J. and I.G. Richards (1990), Use of vegetation in civil engineering, CIRIA, London, UK.
12. Dazioa, E., M. Conedera and M. Schwarz (2018), "Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility", *For. Ecol. Manag.* 417: 63-76.
13. De Blasio, F.V. (2011), Introduction to the physics of landslides: lecture notes on the dynamics of mass wasting, Springer Science & Business Media.
14. Dias, A.S., M. Pirone and G. Urciuoli (2017), Review on the methods for evaluation of root reinforcement in shallow landslides, In: Workshop on World Landslide Forum: Springer. p 641-8.
15. Docker, B. and T. Hubble (2008), "Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species", *Geomorphology* 100(3-4): 401-18.
16. Dorren, L.K., F. Berger, A.C. Imeson, B. Maier and F. Rey (2004), "Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps", *For. Ecol. Manag.* 195(1-2): 165-76.
17. Dupire, S., F. Bourrier, J.-M. Monnet, S. Bigot, L. Borgniet, F. Berger and T. Curt (2016), "The protective effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influence of forest diversity", *For. Ecol. Manag.* 382: 269-79.
18. Fan, C.-C. and Y.-F. Lai (2014), "Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes", *Plant Soil* 377(1): 83-95.
19. Fan, C.-C. and C.-F. Su (2009), "Effect of soil moisture content on the deformation behaviour of root-reinforced soils subjected to shear", *Plant Soil* 324(1-2): 57-69.
20. Forbes, K. and J. Broadhead (2013), Forests and landslides: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia, FAO Regional Office for Asia and Pacific, Bangkok, Thailand.
21. Ghestem, M., R.C. Sidle and A. Stokes (2011), "The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability", *Bioscience* 61(11): 869-79.
22. Giadrossich, F., D. Cohen, M. Schwarz, A. Ganga, R. Marrosu, M. Pirastru and G.F. Capra (2019), "Large roots dominate the contribution of trees to slope stability", *Earth Surf. Process.* 44(8): 1602-9.
23. 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, In: Berger F and Dorren L, editors. Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, Universal Academy Press, Tokyo.
24. Mattia, C., G.B. Bischetti and F. Gentile (2005), "Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species", *Plant Soil* 278(1-2): 23-32.
25. Osman, N. and S.S. Barakbah (2011), "The effect of plant succession on slope stability", *Ecol. Eng.* 37(2): 139-47.
26. Pinder, J.E., J.G. Wiener and M.H. Smith (1978), "The Weibull distribution: a

- new method of summarizing survivorship data", *Ecology* 59(1): 175-9.
27. Pollen, N. and A. Simon (2005), "Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model", *Water Resour. Res.* 41(7).
28. Reneau, S. and W. Dietrich (1987), Size and location of colluvial landslides in a steep forested landscape, Erosion and sedimentation in the Pacific rim. International symposium. International Association of Hydrological Sciences, USA, pp. 39-48.
29. Reubens, B., J. Poesen, F. Danjon, G. Geudens and B. Muys (2007), "The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review", *Trees* 21(4): 385-402.
30. 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): 237-53.
31. Schmidt, K., J. Roering, J. Stock, W. Dietrich, D. Montgomery and T. Schaub (2001), "The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range", *Can. Geotech. J.* 38(5): 995-1024.
32. Schwarz, M., D. Cohen and D. Or (2010a), "Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles", *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 115(F4): F04035.
33. Schwarz, M., F. Giadrossich and D. Cohen (2013), "Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function", *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17(11): 4367-77.
34. Schwarz, M., F. Preti, F. Giadrossich, P. Lehmann and D. Or (2010b), "Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)", *Ecol. Eng.* 36(3): 285-91.
35. Sidle, R.C. and T.A. Bogaard (2016), "Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides", *Earth-Sci. Rev.* 159: 275-91.
36. 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(1-2): 1-30.
37. Tosi, M. (2007), "Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy)", *Geomorphology* 87(4): 268-83.
38. Ugural, A.C. and S.K. Fenster (2003), *Advanced strength and applied elasticity*, Pearson education.
39. Vacchiano, G., R. Berretti, E.B. Mondino, F. Meloni and R. Motta (2016), "Assessing the effect of disturbances on the functionality of direct protection forests", *Mt. Res. Dev.* 36(1): 41-55.
40. Vergani, C., M. Schwarz, M. Soldati, A. Corda, F. Giadrossich, E.A. Chiaradia, P. Morando and C. Bassanelli (2016), "Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland", *Catena* 143: 275-88.
41. Weibull, W. (1939), "A statistical theory of strength of materials", *IVB-Handl.*
42. Wu, T.H., W.P. McKinnell III and D.N. Swanston (1979), "Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska", *Can. Geotech. J.* 16(1): 19-33.
43. Zydrón, T.A., A. Gruchot and M. Kluba (2019), "Spatial variability of reinforcement provided by juvenile root systems of black locust and black poplar", *Pol. J. Environ. Stud.* 28(5).

---

109 年 6 月 17 日收稿

109 年 6 月 22 日修改

109 年 6 月 28 日接受

水土保持學報 50 (4): 2611–2626 (2020)

Journal of Soil and Water Conservation, 50 (4): 2611–2626 (2020)