

森林火災後兩年臺灣二葉松死樹根系加勁力衰減研究

唐立翰⁽¹⁾ 洪大展⁽²⁾ 邱清安⁽³⁾ 宋國彰^{(4)*}

摘要

臺灣每年約發生20起森林火災，且近年來火災有增加的趨勢。森林火災造成樹木死亡後，死亡樹木的根系會逐漸分解，導致土壤中根系加勁力逐漸減弱，而增加邊坡崩塌的風險。本研究旨在調查火災後死樹根系加勁力的衰減。本研究的樣區選在2021年5月發生火災的惠蓀林場第三林班地，研究的目標樹種為當地常見的樹種—臺灣二葉松。根系對邊坡土壤的加勁力取決於單根根力與根的數量。為了量化這些變化，我們進行現地單根拉拔試驗及土壤剖面的挖掘，測量活樹和死亡21個月後樹木的根拉伸強度和根面積比。

結果顯示，與活樹相比，死亡21個月樹根的拉伸強度和根面積比並沒有顯著下降，因此根系加勁力尚未出現明顯的衰減。儘管如此，死亡21個月樹木已出現細根(根徑小於2mm)數量和密度減少的趨勢。在不久的將來，這種死根被分解的現象應該會逐漸發生在較粗的根，而導致根系加勁力的下降。

(**關鍵詞**：森林火災、根面積比、根力、單根抗拉拔試驗、邊坡穩定)

Study on Root Reinforcement Decline of Dead *Pinus taiwanensis* Two-Year after Forest Fire

Li-Han Tang⁽¹⁾ Da-Jhan Hong⁽²⁾ Ching-An Chiu⁽³⁾ Guo-Zhang M. Song⁽⁴⁾

Master student⁽¹⁾, Master⁽²⁾, Associate Professor⁽⁴⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

Associate Professor⁽³⁾, Department of Forestry, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

Taiwan experiences approximately 20 forest fires each year, and the number of fire events has been increasing in recent years. Forest fires result in tree mortality, and the subsequent decomposition of dead roots in the soil gradually reduces root reinforcement, thereby increasing the risk of slope failure. This study aims to investigate the decay of root reinforcement in dead trees following a fire.

The study site was located in Stand 3 of the Hui-Sun Experimental Forest, which underwent a forest

⁽¹⁾ 國立中興大學水土保持學系 碩士生

⁽²⁾國立中興大學水土保持學系 碩士

⁽³⁾國立中興大學森林學系 副教授

⁽⁴⁾國立中興大學水土保持學系 副教授(通訊作者 e-mail : mikesong@nchu.edu.tw)

fire in May 2021. The target species was *Pinus taiwanensis* Hayata, the commonly-seen tree species there. Root reinforcement on slopes depends on root tensile strength and root quantity. To quantify the changes of these two factors, we conducted *in-situ* single root pull-out tests and soil profile excavations to measure the root tensile strength and root area ratio (RAR) of both live trees and trees that had been killed by the fire for 21 months.

The results show that compared to living trees, the tensile strength and RAR of roots from trees that have been dead for 21 months have not significantly decreased, indicating that the reinforcement effect of the roots has not yet shown a noticeable decline. However, there is a trend of reduced quantity and density of fine roots (root diameter < 2 mm) in trees dead for 21 months. In the near future, this decomposition of dead roots is expected to gradually affect the thicker roots, which will lead to a reduction in root reinforcement.

(Keywords : forest fire, root area ratio, root strength, single-root pullout test, slope stability)

前言

根據林業署(2021)的數據，臺灣近幾年在2017年至2021年的冬季期間，森林火災事件數量分別為23、19、22、20以及25起，呈現逐漸增加的趨勢。而2021年，臺灣遭遇了近50年來最嚴重的乾旱，導致多地發生森林火災。臺灣本身就因地質脆弱和頻繁的強降雨而易於發生土砂災害，而森林火災的發生將進一步提高此類災害的風險(Rengers et al., 2020)。

植物在水土保持與邊坡穩定中有至關重要的作用。草本植物能有效減緩裸露坡面的地表逕流和雨滴造成的土壤沖蝕(陸象豫，2011)，而木本植物的根系則通過錨定效果顯著提高坡面的穩定性(黃群翰，2013)。植生的水文及土壤力學作用能夠有效防止淺層崩塌

的發生 (Gray and Barker, 2004)。

火災對森林的最直接影響是降低其水文功能(Beatty and Smith, 2013)，增加土壤沖蝕。這主要是因為火災後，樹冠層葉片大量減少，導致雨水截留和蒸散作用這兩個植生水文作用顯著下降。截留作用減少使得穿落水增加，降雨時土壤更容易達到水份飽和狀態，而增加地表逕流量 (Moody et al., 2013)。另一方面，葉片減少會降低植物的蒸散作用，導致降雨過後土壤水份無法在短時間內降低，因此容易在下一次降雨時達到飽和狀態。由於火災大多由地表開始，因此地被植物通常會被燒毀。地被植物覆蓋度減少導致雨滴直接撞擊地表，造成濺蝕，加速土壤流失，同時也降低了地表粗糙度，增加了地表逕流速度，進一步加劇土壤沖蝕 (Moody et al., 2013)。

森林火災後，常見的土壤問題包括入滲能力下降和地表逕流增加，這些都會降低邊坡的穩定性。這些現象的成因可以從物理和化學兩個層面來分析。物理層面上，火災後的土壤表層與植物燃燒留下的灰燼混合，導致土壤孔隙率降低，水份難以入滲（Stoof et al., 2010）。化學層面上，焚燒樹木產生的灰燼與土壤中的有機質在火災高溫下反應，形成疏水性土壤層。這會進一步減少雨水的入滲，增加地表逕流量並提高下坡處淺層崩塌的風險（DeBano, 2000）。這些因素共同作用下，增加了火災後土壤的不穩定性。

在森林坡地中，根系與土壤的交互作用顯著提升了邊坡的穩定性，這種現象被稱為「根系加勁力」。植生通過根系加勁作用能夠增強土壤對移動的抵抗力，這種作用主要因為根系改變土壤顆粒間的摩擦力、土壤凝聚力和土壤硬度而發生的(Schwarz et al., 2013)。火災對森林的影響不僅涉及地表樹冠和樹木的生存，還能影響土壤中的根系結構(Vergani et al. 2017)。火災後雖然死樹根系的加勁力不會立即消失，但隨著時間推移，這種加勁力會逐漸減弱，最終因土壤微生物的分解作用而完全消失。這種根系加勁力的衰減會直接增加淺層崩塌的風險。

本研究旨在探討森林火災後根系加勁力的衰減情形。以2021年5月惠蓀林場森林火災為案例，調查火災發生21個月後臺灣二葉松的單根抗拉拔力及根面積比變化，進一步分析根系加勁力的衰減程度，為未來火災後初期的邊坡管理提供科學依據。

研究區域

惠蓀林場位在南投縣的仁愛鄉及國姓鄉交界，烏溪集水區內。總面積為7,477公頃，劃分為19個林班，年平均溫度為16.2°C，平均年降水量為2,444mm，海拔從450m到2419m，海拔落差將近2000m，涵蓋了亞熱帶、暖帶以及溫帶的氣候，林場內的植生則主要以天然闊葉林為主，其他則為天然針闊葉混和林以及人工針葉林。2021年5月13日，惠蓀林場發生森林火災，受損面積約21ha。本次森林火災一共出現2處火場，第一火場位於惠蓀林場東北邊的第3林班地，從杜鵑嶺往南延燒至森林浴步道入口處(圖2)，第二火場則是位在一號橋南側的第1林班地。



圖1 研究樣區森林火災前後比較

材料與方法

1. 研究樹種

本次研究樹種為臺灣二葉松（*Pinus taiwanensis* Hayata），為松科松屬的常綠大喬木，分布於海拔700 m至3000 m之間。臺灣二葉松是當地崩塌地區常見的先驅裸子植物。在進行野外調查時，樹種的辨識通常依靠

葉片形態。臺灣二葉松的葉片呈2針1束，長約8至11公分，質地偏硬直。其樹皮顏色為深灰褐色，並具有不規則的裂紋(圖2)。這些樹皮特徵讓我們可以輕易地在沒有葉子的死樹中，找出臺灣二葉松。臺灣二葉松根部表皮較薄且容易片狀剝落，也明顯與其他樹種不同。

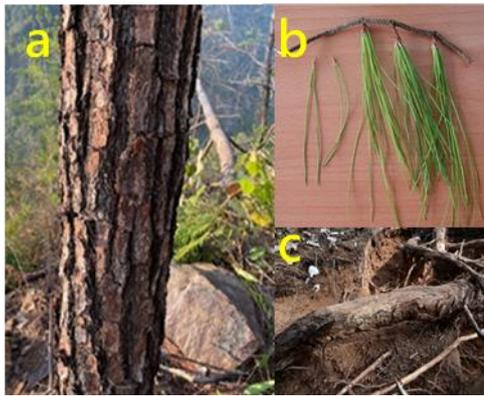


圖2 臺灣二葉松特徵(a)樹皮(b)葉(c)根

2. 樹木根系支根力評估理論

根系對土壤提供的額外加勁力是邊坡穩定性的重要因素。樹木根系穿過潛在的滑動面，能有效防止淺層崩塌的發生。根系的加勁作用可減少淺層崩塌的機率與規模 (Gray & Barker, 2004)。根系加勁力的研究主要集中在根系的空間分布、材料強度及根系與土壤交互作用的模擬。

在過去的根系力學研究中，多數專家學者假設邊坡滑動時的破壞機制是滑動面會與根系交錯，從而提供額外的剪力強度。而根系力學之加勁力可分為兩種，一種是基部加勁力(由位於滑動土體底部剪切面處的垂直根所提供)；另一種是側向加勁力(由位於滑動土體上緣的側根所提供)(如圖3)。

滑動過程中側根的加勁效果大於垂直根

系 (Schwarz et al., 2010)。這是由於大部分的根集中在土壤表層處，能深及到滑動土體底部剪切面的根很少，這使得植物所能提供的側向加勁力高於基部加勁力。也就是，當土體發生滑動時，側根的加勁作用往往高於垂直根系 (Schwarz et al., 2015; Giadrossich et al., 2017)。

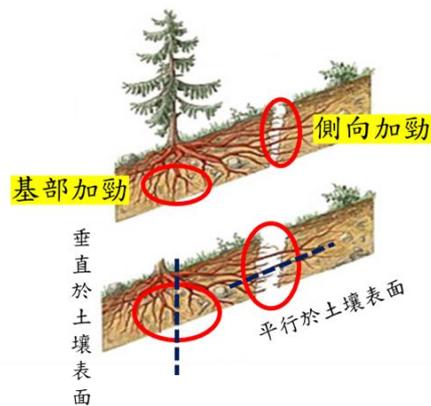


圖3 植物根系面對邊坡滑動時示意圖

(Schwarz et al., 2010)

學者們通過不同的試驗方法，發現了根直徑與抗拉拔力(F)之間的關係，根直徑越大，抗拉拔力(F)越高。陳蒼緯 (2020)的現地拉拔試驗結果同樣支持這一結論。拉拔勁度(K)是評估根系對邊坡穩定性影響的重要指標之一。通常，拉拔勁度越低表示根的延展性越好，不穩定的土體更容易產生張力裂隙，而增加雨水入滲，提高崩塌潛勢。

Schwarz et al. (2013) 提出了根束模型 (Root Bundle Model with Weibull survival function, RBMw) 用以計算單根的力-位移關係，此根束模型探討根系在漸進破壞過程中所能抵抗的外在作用力。並使用現地拉拔試驗數據擬合了一個方程式，該方程式可以用

來估算單根最大抗拉拔力 (F_{max})和拉拔勁度 (K)，兩者皆作為根直徑 (ϕ) 的函數。

$$F_{max}(\phi) = F_0(\phi)^\delta$$

$$E(\phi) = E_0(\phi)^\beta$$

式中 F_{max} 單根最大抗拉拔力(N)； ϕ 根直徑 (mm)； F_0 、 E_0 =比例因子； δ 、 β =冪函數之係數。

再來建立單根之拉拔力與位移之函數。

$$F(\phi, \Delta x) = K(\phi)\Delta x$$

式中 K 為拉拔勁度(N/m)。

過去實驗發現根拉伸強度(單位根截面積下的抗拉力)會隨根直徑增加而下降。細根的拉伸強度較粗根更高，可能是由於細根含有較多纖維素，而纖維素具有較佳的拉伸能力 (Genet et al., 2005)。草本植物的根系拉伸強度通常在4至20 MPa 之間，而木本植物的範圍則為5至70 MPa (Coppin, 1990)。在固定地點和物種下，雖然根徑與拉伸強度呈冪律關係，但環境條件如地形、土壤肥力和水份含量，可能導致根系纖維素含量和拉伸強度的變化 (Hales et al., 2009)。

$$T_r = ad^b$$

式中 T_r 單根拉伸強度(MPa)； d 根直徑 (mm)； a 為比例因子； b 為冪函數之係數。

3.根面積比

根面積比(root area ratio, RAR)是根截面積與在土壤剖面面積中所占之比例，這是除了根拉伸強度外，另一個影響根系加勁力的重要因子。根面積比會因為氣候水文、土壤性質以及物種而呈現隨機分布。一般而言，根面

積比會隨著深度的增加而減少(Bischetti et al., 2007)。本研究為了更精確地記錄不同深度層的根數量和大小，將土壤分成五層深度(0-5、5-10、10-20、20-30、30-60 cm)(圖4)，記錄各層中五個根勁級距(1-2、2-4、4-8、8-15、15 mm 以上)的數量。



圖4 剖面法挖掘的土壤剖面

4.現地單根拉拔試驗

根系加勁力的強弱一直都被視為衡量邊坡穩定的重要指標，故量化根系加勁力可以有有效的檢視植生工程的成效。然而根系除了物種差異之外，也常常會因為環境因子，如溫度、水文、土壤及海拔等因素而存在個體之間的差異。考量到數據現場能涵蓋到現地環境因素，因此採用現地單根拉拔試驗(Single root pullout tests)而不是室內的單根拉力強度試驗(Tensile strength tests on roots)。

此種試驗方法可以根據每條根生長的方向不同而調整施力的方向，能同時考量到土壤與根之間的交互作用力，且試驗方式合乎 Root Bundle Model 的假設，當根在抵抗拉力時產生的位移會影響根力的大小，為最接近現實情況的試驗方法。

此試驗會先在確認目標樹種後，將含根的土壤剖面挖掘並裸露出來，再以電動絞盤提供的拉力將單根拉出，途中以資料紀錄器測得單根的抗拉拔力以及過程產生的位移形變並記錄之。

4.1 目標植株選取

本研究選擇樣區內未受火災影響的健康臺灣二葉松作為對照組，實驗組則為火災後經過21個月的臺灣二葉松。在選擇死樹的目標樹種時，依據樹木枯死判定標準(圖5)，若樹木在非落葉期內，其葉片乾枯脫落達三個月以上，枝條易折斷，樹皮乾裂或異常脫落，或刮開樹皮表層後出現乾枯或腐朽情況，則可判定該樹木已枯死。



圖5 二葉松死亡後不同部位特徵，(左)為落葉乾枯狀態(右)為樹皮乾裂或異常脫落

4.2 確認挖出根系所屬的樹木

由於土壤中的根系錯綜交織，且根部不

像地上部分如葉片和莖幹那樣具有明顯特徵，如何有效率且準確識別目標植株的根系是一個難題。雖然可以從樹木基部開始挖掘，直至根徑縮小至適合儀器測量的範圍，這過程需要花費大量時間，且挖出的根系因數量眾多需要花大量時辨識是否為目標根系。因此，我們在選擇目標物種時，需確保目標植株周圍1.5米範圍內無其他喬木，以確保所挖掘的根系大部分屬於該植株，避免其他樹木的根系干擾我們進行目標根系的辨識。

4.3 土壤剖面挖掘及根面積比量測

降雨時，樹幹流會將水份快速沿著樹幹輸送至地表，提升土壤中的水份含量。這種現象在基徑較大的樹木周圍表現得更加顯著(Tanaka et al., 1996)。為了確保根系的分解過程不受到過多水份的影響，我們選擇在其樹幹距離80 - 100cm 處，進行土壤剖面挖掘及根面積比測量。

參考尤子豪(2018)提出的土壤剖面尺寸(寬40 cm，深40 cm)，在距離目標樹木50至100 cm 的範圍內選定土壤剖面的開挖位置。由於根徑中包含許多細小根系，為避免對其造成損傷，採用螺絲起子配合徒手方式進行挖掘。當含根土壤剖面暴露後，選擇遠離樹木的一側進行根面積比的計算，最後進行單根抗拉拔試驗的單根選取。

4.4 試驗單根選取

尤子豪(2018)的研究結果顯示，當根系取樣數量達到30根以上時，無論取樣數為30、40或50根，單根抗拉拔力數據之間的差異並不顯著。然而，當進行根系加勁力的計算時，取樣數量的變化會導致結果的顯著差異。當

使用 RBMw 模型估算坡面上樹種根系的加勁力時，增加單根拉拔試驗的取樣數量以及選取更粗的根徑，將提高計算的準確度，本次試驗活樹取樣根數為31根，死樹為43根，符合文獻中對單根抗拉拔力的要求。

本研究使用的拉拔力設備為電動絞盤(圖6、表1)，最大可施加約5000牛頓的拉力。參考先前的研究結果(尤子豪，2018；陳蒼緯，2020)，因為太細的根系在實驗過程中容易斷裂，而太粗的根則會超出儀器的拉力範圍，因此，本研究設定取樣根徑範圍為2至40 mm，並在有限樣本內優先選取接近40 mm 的粗根，以提升計算結果可以更符合現地根系實際狀況。

4.5 單根抗拉拔力量測

在實驗過程中，目標根系首先被細鐵絲和牙棒固定(圖7)，隨後將拉壓式荷重感應器 (load cell) 和拉線位移感測器 (displacement sensor) 安裝於固定的牙棒上，這些設備分別記錄單根的拉力和位移，這些數據均由電壓訊號紀錄器以每秒5次的頻率記錄。當設備安裝完成後，開始進行拉拔試驗，直至根部完全拉出或斷裂為止(圖8)。根被拉出後，測量其直徑和生長深度，並將所有測量結果保存在資料紀錄器中。

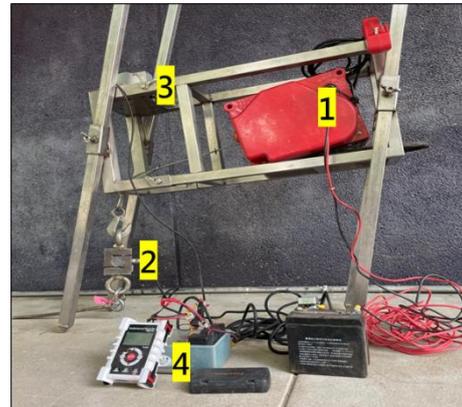


圖6 單根拉拔試驗儀器配置圖。各儀器的詳細說明在表1。



圖7 綁在牙棒上的根段



圖8 試驗後拔出的根段

表1 現地單根拉拔試驗使用儀器

儀器	名稱型號	說明
	電動絞盤 W08-5060	相較於手動絞盤，可以提供更穩定的拉力。使用12V 電壓，可提供最高4900N 之拉力。
	拉壓式荷重感應器 HMD1005	將兩端分別與根和絞盤連接，量測試驗期間所受拉力。使用9V 的乾電池供電，可測量10~500 公斤重的拉(壓)力。
	拉線位移感測器 HPS-M1	將拉線固定在根端，待試驗結束後即可知期間根的拉長形變量。由兩個6V 乾電池串聯而成的裝置供電。可供量測行程為500~5000mm。
	電壓訊號紀錄器 MCR-4V	記錄下荷重計以及位移器產生的電流，並以每秒5次的頻率記錄。可將所得讀數以 T&D Graph 呈現。

結果與討論

1. 單根抗拉拔力

根徑小於15mm 時，死樹的單根抗拉拔力與活樹的並沒有明顯差異 (圖9-a)。雖然根徑大於15mm 時，死樹的單根抗拉拔力有大於活樹的趨勢，但這應該是當初未能取樣到較粗死樹根所造成的。尤子豪(2018)的研究結果就顯示，粗根因為數量少，加上不易拉斷測出抗拉拔力，而少了粗根樣本，回歸曲線的走勢容

易受到影響。

2. 拉伸強度

直徑大於10mm 死樹根的拉伸強度看似略高於活樹根的，但兩者95%信賴區間有重疊，因此兩者的拉伸強度是沒有明顯的差異 (圖9-b)。無論是活樹還是死樹，較細的根通常比粗根有更強的拉伸強度(圖9-b)。這與前人研究成果是一致的(尤子豪，2018; 陳蒼緯，2020)。也就是說，儘管一支細根提供的抗拉拔力較弱，但由於細根在根系中的數量較多，

當其總截面積與一支粗根相同時，細根能提供的加勁力會高於粗根。 強度 (c)拉拔勁度。虛線是95%信賴區間。

3.拉拔勁度

活樹與死亡兩年內的死樹的根的拉拔勁度比較之下，和單根抗拉拔力相同，均無法觀測到顯著的差異 (圖9-c)。

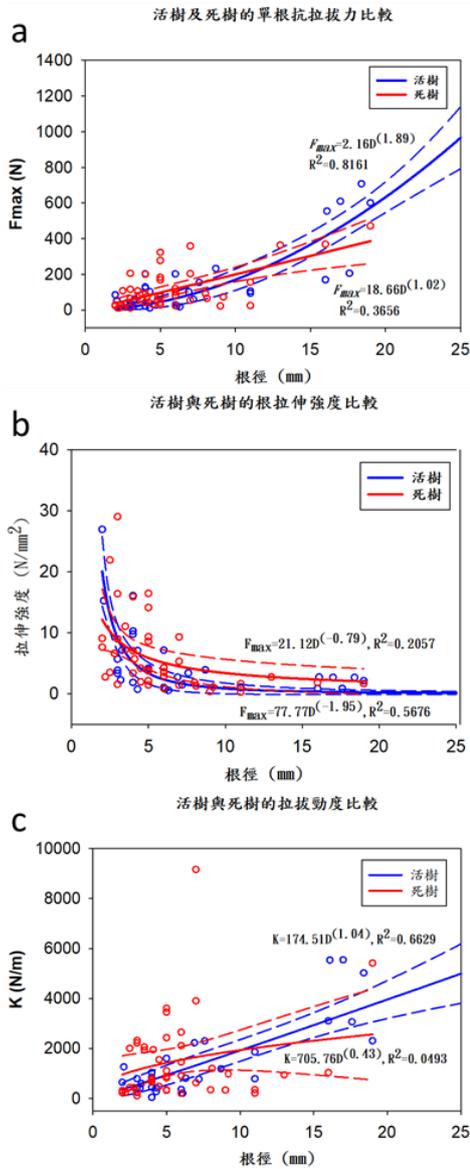


圖9 活樹與死樹之 (a)單根抗拉拔力 (b)拉伸

4. 根面積比

4.1 總根面積比

在本次試驗中，選取了12棵樹，其中，活樹與死樹各取6棵胸高直徑12-37cm 樹木。在樹旁挖掘出寬60 cm、深60 cm 的矩形土壤剖面進行根的調查。Two-sample paired t test 顯示，我們所取樣的活樹與死樹在胸高直徑上是沒有顯著差異的(表2)。與活樹相較之下，即使樹木在死亡兩年後，其總根面積比並無明顯的下降 (表2)。不過以不同土壤深度進一步分析後，結果顯示0-5 cm 深度的土壤層中，死樹在根數量與根面積比都明顯低於活樹的，而在較深的土壤中兩者則沒有明顯差異(圖10)。這顯示淺層死根的分解速率比深層的快。導致這個現象的原因應該是，比起深層土壤，淺層土壤的有機質含量較多，通氣程度較高，因此微生物分解者多(Biswas & Kole, 2017)。

4.2 1-2 mm 直徑的根特性

雖然總根面積比上，死樹與活樹沒有顯著差異，但細根(根徑1-2 mm)在數量及面積上，死樹是低於活樹的(表2)。從圖11-a 可看出，死樹1-2 mm 根徑平均根數明顯少於活樹的，而大於2 mm 根徑的根數，兩者則差異不大。顯示1-2 mm 直徑的根在樹木死亡兩年後，已開始有明顯的分解。以1-2 mm 直徑的根在總根截面積百分比來看，不只是所占百分比極低，而且死樹與活樹沒有顯著差異(圖11-b)。就是因為1-2 mm 直徑的根在總根截面積所佔的百分比極低(圖11-b)，即使死樹直徑1-2 mm 根的數量及截面積都低於活樹的(表2)，但死樹與活樹兩者總根面積比是沒有顯著差異的(表2)。

5. 根系加勁力

根系對於土壤的加勁力決定於兩個因子—根拉伸強度與根面積比。由於在根拉伸強度與根面積比上，本研究中死樹與活樹並沒有顯著差異(圖9-b, 表2)，因此兩者的根系加勁力也是沒有顯著差異的。不過死樹1-2 mm 直徑的根的數量及在總根數量的佔比，都是低於活樹的，這顯示這些細根已開始分解(表2)。O'loughlin 與 Watson (1979)測量放射松(*Pinus radiata*)砍伐3到29個月後的根直徑，發現平均根直徑持續隨時間而增加。這是因為樹木死亡後，細根最早被分解掉，接著粗根會分解，導致殘留根的平均直徑隨時間增加。這個趨勢會在不久的將來發生在惠蓀林場的火燒森林。O'loughlin 與 Watson (1979)也發現，放射松砍伐14個月後，根拉伸強度就只剩一半。相對的，惠蓀林場的臺灣二葉松在火災21個月後，其根拉伸強度沒有明顯衰減。可能原因是，臺灣二葉松都生長在土壤乾燥的山脊，因此微生物分解者的分解力不旺盛。總之，火災後兩年內，死樹的根系加勁力尚未有明顯的衰減，但已觀察到細根開始被分解了。之後，會因粗根的分解造成拉伸強度與根面積比的下降，而導致根系加勁力的衰減。

著，*表示差異顯著($p < 0.05$)。

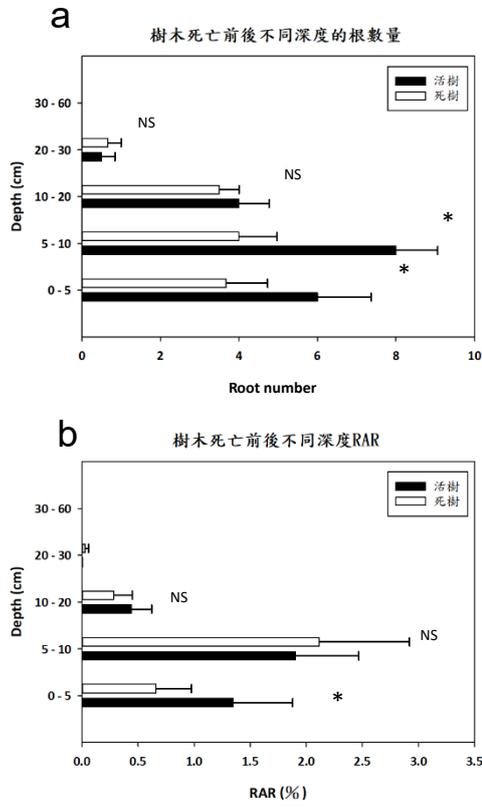


圖10 樹木死亡前後不同深度的(a)根數量及(b)根面積比(RAR)。NS 表示差異不顯

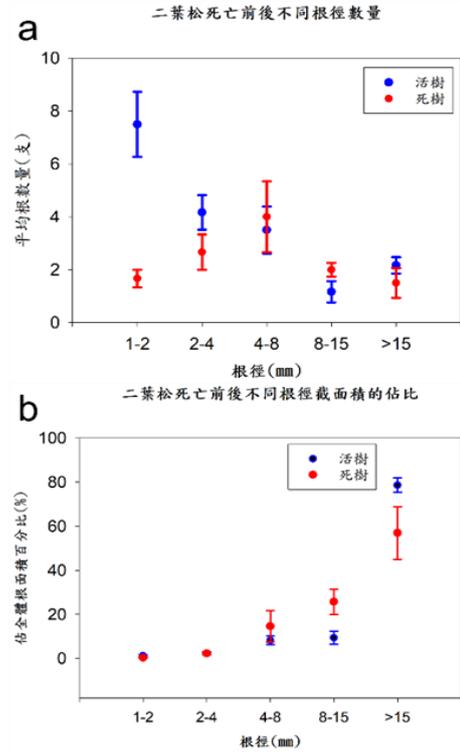


圖11 二葉松死亡前後各根徑級距(a)根數量及(b)根截面積變化

表2 各組土壤剖面1-2mm 根各項對比

組別	樹木 DBH(cm) ^{NS}	總根面積比 ^{NS}	直徑 1-2mm 根數量(支)*	直徑 1-2mm 根數量在總根 數量的佔比 (%)*	直徑 1-2mm 根在 總根面積的佔比 (%)*
1	12.3 / 12.9	0.0015/ 0.0021	9 / 2	64.29 / 22.22	2.95 / 0.47
2	13.8 / 15.2	0.0038/ 0.0018	3 / 1	16.67 / 14.29	0.38 / 0.27
3	20.5 / 18.0	0.0045/ 0.0063	6 / 1	33.33 / 5.56	0.66 / 0.08
4	20.7 / 22.5	0.0034/ 0.0022	8 / 3	34.78 / 33.33	1.14 / 0.68
5	26.2 / 28.8	0.0029/ 0.0013	12 / 1	66.67 / 6.67	2.02 / 0.38
6	37.0 / 36.9	0.0046/ 0.0034	7 / 2	35.00 / 15.38	0.46 / 0.29

註1:表格中活樹與死樹的數據以不同顏色標示，活樹使用藍色標示，死樹使用黑色標示。

註2:星號(*)表示 Two-sample paired t tests 之 *p*-value 小於0.05，有顯著差異; NS 表示兩者之間無顯著差異。

結論與建議

- 1.台灣二葉松在死亡後21個月內，根系的單根抗拉拔力和拉拔勁度均未有顯著衰減。
- 2.在樹木死亡的兩年內，1-2mm 以下的細根數量顯著減少，原因是根系在死亡後細根是最早被分解的。
- 3.影響根系加勁力的因素主要是單根抗拉拔力和根面積比。本研究中，單根抗拉拔力無論根徑大小，均未顯示顯著的衰退現象，因此火災後的21個月根系加勁力衰退並不明顯。
- 4.在較粗根徑範圍內，死樹的根徑截面積佔比明顯高於活樹，這表明粗根在樹木死亡後

21個月內的結構仍能保持良好，中等和粗根還保持一定強度，顯示初期的衰退過程較為緩慢。

- 5.本研究主要探討樹木死亡後兩年內的單根抗拉拔力和根面積比，尚未能觀測到單根抗拉拔力何時開始衰退，以及2mm 以上根徑的根何時分解時機，後續研究可以補充更長時間的資料。

誌謝

本研究承蒙國家科學及技術委員會計畫(MOST111-2625-M-005-010)經費補助，特此致謝。

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」, 國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
2. 林業署 (2021), 「國有林地火災資訊公開與林火防救措施說明記者會」
<https://www.cna.com.tw/news/ahel/202103250141.aspx>, 林業署。
3. 陸象豫 (2011), 「坡地土壤流失量估算簡介與生覆蓋之效益」, *林業研究專訊*, 18(4), 63-66。
4. 黃群翰 (2013), 「植物根系生長型態於植生邊坡穩定之角色」, 國立高雄第一科技大學營建工程研究所碩士論文。
5. 陳蒼緯 (2020), 「台灣低海拔森林演替早期與晚期樹種根力比較」, 國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
6. Beatty, S. M., & Smith, J. E. (2013). Dynamic soil water repellency and infiltration in post-wildfire soils. *Geoderma*, 192, 160–172.
7. Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., & Zocco, A. (2007). Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). In *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability: Proceedings of the First International Conference on Eco-Engineering 13–17 September 2004* (pp. 31-41). Springer Netherlands.
8. Biswas, T., Kole, S.C. (2017). Soil Organic Matter and Microbial Role in Plant Productivity and Soil Fertility. In: Adhya, T., Mishra, B., Annapurna, K., Verma, D., Kumar, U. (eds) *Advances in Soil Microbiology: Recent Trends and Future Prospects. Microorganisms for Sustainability*, vol 4. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7380-9_10-
9. Coppin, N. J. (1990). *Use of vegetation in civil engineering*. In I. G. Richards (Ed.), (pp. 23-36). Butterworths: Ciria.
10. DeBano, L. F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review. *Journal of Hydrology*, 231, 195–206.
11. Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S. B., Fourcaud, T., Dumail, J. F., & Van Beek, R. (2005). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 278(1-2), 1-9.
12. Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Cislighi, A., Vergani, C., Hubble, T., Phillips, C., & Stokes, A. (2017). Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: A review. *Ecological Engineering*, 109, 256-271.
13. Gray, D. H., & Barker, D. (2004). Root-soil mechanics and interactions. In *Riparian vegetation and fluvial geomorphology* (pp. 113-123).
14. Hales, T. C., Ford, C. R., Hwang, T., Vose, J. M., & Band, L. E. (2009). Topographic and ecologic controls on root reinforcement. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F3).
15. O'loughlin, C. & Watson, A. (1979) Root-wood strength deterioration in radiata pine after clearfelling. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 9, 284-293.
16. Rengers, F. K., McGuire, L. A., Oakley, N. S., Kean, J. W., Staley, D. M., & Tang, H.

(2020). Landslides after wildfire: Initiation, magnitude, and mobility. *Landslides*, 17, 2631-2641.

17. Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P., & Or, D. (2010). Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering*, 36(3), 285-291.

18. Schwarz, M., Giadrossich, F., & Cohen, D. (2013). Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4367-4377.

19. Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., Stolz, M., & Thormann, J. J. (2015). Root reinforcement of soils under compression. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(10), 2103-2120.

20. Stoof, C. R., Moore, D., Fernandes, P. M., Stoorvogel, J. J., Fernandes, R. E., Ferreira, A. J., & Ritsema, C. J. (2013). *Hot fire, cool soil*. *Geophysical Research Letters*, 40(8), 1534-1539.

21. Vergani, C., Werlen, M., Conedera, M., Cohen, D., & Schwarz, M. (2017). Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest. *Forest Ecology and Management*, 400, 339-352.

22. Tanaka, T., Taniguchi, M., & Tsujimura, M. (1996). Significance of stemflow in groundwater recharge. 2: A cylindrical infiltration model for evaluating the stemflow contribution to groundwater recharge. *Hydrological Processes*, 10(1), 81-88.

23. Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud,

P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, 122, 10-37.

113 年 11 月 18 日收稿

114 年 2 月 18 日修改

114 年 2 月 18 日接受