

計畫編號：SWCB-110-030

應用於河口飛砂區抗風蝕草種之研究
Study on the Application of Wind
Resistant Grass Species
in Estuary Sand Drift Area
(成果報告書)

執行單位：國立嘉義大學

執行期間：110年01月27日至110年12月31日

計畫主持人：李嶸泰 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國一一〇年十二月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

應用於河口飛砂區抗風蝕草種之研究

摘要

臺灣冬季河床常呈現裸露，強勁的東北季風易引起嚴重的飛砂，不僅降低空氣品質，也危害周遭居民的健康。因此，本計畫透過現地栽植和苗圃栽植試驗，調查甜根子(*Saccharum spontaneum*)、臺灣蘆竹(*Arundo formosana*)和蘆葦(*Phragmites australis*)的生長表現，利用風洞試驗分析三種本土草種的抗風蝕能力，並藉由根系生物力學試驗了解植株抗拉拔能力和含根土體抗剪強度。

研究結果顯示，甜根子的高生長表現最佳，次之為蘆葦，再者為臺灣蘆竹。風洞試驗結果顯示，在植株覆蓋率達 20%即開始有明顯的風蝕降低效果，約可降低 50%的飛砂量，在低風速(6.3 m/s)及高植株覆蓋度(60%)時，臺灣蘆竹的表現優於其他草種。若處於高風速(10.8 m/s)及低植株覆蓋度(20-40%)狀況，蘆葦和甜根子具有較佳之表現。在根系力學方面，由於甜根子的根系較為繁茂能提供較強之土體抗剪強度增量，其強度為蘆葦的 1.85 倍，臺灣蘆竹的 8.24 倍。

綜合以上研究結果顯示，試驗草種均具有優良的抗風蝕能力，惟其抗風蝕能力隨不同風速和植株覆蓋度而異。由於甜根子和蘆葦根系比臺灣蘆竹者具有較佳的抗剪強度與抗拉拔能力，可優先選擇栽植於脆弱的河岸邊坡。另一方面，因臺灣蘆竹較易扦插繁殖且其小苗的存活率高，所以選擇此草種種植可降低植被管理成本。此外，在沿海地區，可選擇具較佳耐鹽性的蘆葦作為栽植草種，以提升治理飛砂的成效。

關鍵詞：甜根子、臺灣蘆竹、蘆葦、抗風蝕能力、根系力學、飛砂

Study on the Application of Wind Resistant Grass Species in Estuary Sand Drift Area

Abstract

In southern Taiwan, it is dry in winter and the riverbeds are often exposed. Strong northeast monsoon frequently cause serious sand drift, which not only reduces air quality but also threatens the health of surrounding residents. Thus, this study is aimed at investigating the growth performance of wild sugracane (*Saccharum spontaneum*), Taiwan giantreed (*Arundo formosana*) and common reed (*Phragmite australis*) through field planting and nursery planting, analyzing the anti-wind erosion ability of these three grass species utilizing wind tunnel test, and evaluating plant pull-out ability and root-containing soil shear strength using root biomechanical test.

Results of this study show that *Saccharum spontaneum* has the best height growth performance, followed by *Phragmite australis*, and *Arundo formosana* is the last. Results of wind tunnel test demonstrate that the test grass species have significant reduction in wind erosion as the plant coverage reaches 20%. It can reduce the amount of sand drift by 50%. Furthermore, at low wind speed (6.3 m/s) and high plant coverage (60%), *Arundo formosana* has the better anti-wind erosion ability than the other species. However, at high wind speed (10.8 m/s) and low plant coverage (20-40%), *Saccharum spontaneum* and *Phragmite australis* have better anti-wind erosion ability than *Arundo formosana*. *Saccharum spontaneum* has more profuse root system, which can provide stronger soil reinforcement strength. The soil shear strength increment of *Saccharum*

spontaneum is 1.85 times that of *Phragmite australis* and 8.24 times that of *Arundo formosana*.

Taken together, the results of this research reveal that the three grass species have excellent anti-wind erosion ability, which varies with wind speeds and plant coverages. Since *Saccharum spontaneum* and *Phragmite australis* have better shear strength and plant pull-out ability than that of *Arundo formosana*, they can be selected for stabilizing fragile river bank slope. On the other hand, it is easy to propagate *Arundo formosana* with cutting technique and the seedling survival rate is high. Thus, planting of *Arundo formosana* can reduce the cost of vegetation management. Furthermore, in coastal areas, *Phragmite australis* with better salt tolerance can be used as planting species in order to improve the effectiveness of sand drift control.

Keyword: *Saccharum spontaneum*, *Arundo formosana*, *Phragmite australis*, anti-wind erosion ability, root mechanics, sand drift.

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	VI
圖次.....	VII
第一章 緒論.....	1-1
第二章 文獻回顧	2-1
第一節 飛砂形成原因	2-1
第二節 植物與風蝕之關係	2-1
第三節 植物根系分類與根系力學	2-2
第四節 相關揚塵抑制工法及現行法規	2-4
第三章 工作執行方法與步驟	3-1
第一節 試驗草種採集及繁殖	3-3
第二節 根系觀察與力學試驗組	3-6
第三節 風蝕試驗	3-11
第四節 試驗資料統計分析	3-16
第四章 結果與討論	4-1
第一節 植物生長試驗	4-1
第二節 風洞試驗	4-9
第三節 根系型態與分布	4-13
第四節 根系力學	4-18
第五節 小結	4-36
第五章 結論與建議	5-1
第一節 結論	5-1

第二節 建議	5-3
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一 期末審查意見回覆	附錄-1
附錄二 期中審查意見回覆	附錄-2
附錄三 土樣粒徑分布	附錄-4
附錄四 期初審查意見回覆	附錄-5
附錄五 創新研究補助計畫會辦明細表	附錄-8

表次

表 1-1 計畫工作項目檢核表	1-2
表 2-1 根系深度與抗剪強度之關係	2-4
表 2-2 國內外飛砂防治相關彙整表	2-8
表 2-3 臺灣治理飛砂之應用方法及成效	2-12
表 3-1 試驗砂土粒徑分布表	3-4
表 3-2 不同植株覆蓋度分布狀況	3-13
表 4-1 現地栽植植物基本資料	4-3
表 4-2 現地植株生長調查結果	4-4
表 4-3 苗圃栽植生長試驗調查成果	4-8
表 4-4 三草種在風速 6.3 m/s 時不同覆蓋度間風蝕率之差異	4-13
表 4-5 三草種在風速 10.8 m/s 時不同覆蓋度間風蝕率之差異	4-13
表 4-6 臺灣蘆竹、甜根子草及蘆葦形態特徵及功能性狀比較	4-15
表 4-7 三草種之各土層深度與根面積比之關係	4-16
表 4-8 三草種之各土層深度與根數量之關係	4-17
表 4-9 三草種與裸土之最大抗剪力、抗剪強度之增量與土層深度 30 cm 根系分布之狀況	4-19
表 4-10 三草種之最大抗拉拔力	4-21
表 4-11 臺灣蘆竹植物性狀與拉拔抗力之相關性矩陣	4-23
表 4-12 甜根子草植物性狀與拉拔抗力之相關性矩陣	4-24
表 4-13 蘆葦植物性狀與拉拔抗力之相關性矩陣	4-25
表 4-14 三草種之單根力學試驗	4-29
表 5-1 三物種生長情形與各項能力統整	5-3

圖次

圖 2-1 根徑與拉伸強度及抗拉強度之關係.....	2-3
圖 3-1 工作流程圖	3-2
圖 3-2 八掌溪樣區之砂土粒徑分布圖	3-4
圖 3-3 計畫草種採集示意圖	3-5
圖 3-4 計畫之現地栽植樣區	3-5
圖 3-5 現地樣區植株分布圖	3-6
圖 3-6 植生剪力試驗儀	3-7
圖 3-7 拉拔試驗儀	3-8
圖 3-8 全根開挖法示意	3-9
圖 3-9 WinRHIZO 軟體操作介面	3-10
圖 3-10 單根拉力試驗儀	3-11
圖 3-11 Image J 軟體操作介面.....	3-14
圖 3-12 風洞試驗示意圖	3-15
圖 3-13 風洞實驗實際配置圖	3-16
圖 4-1 現地植物生長之情形	4-1
圖 4-2 第 2 次樣現地栽植區實際圖	4-2
圖 4-3 第 2 次現地栽植樣區示意圖	4-2
圖 4-4 三草種第 2 次現地之累積生長量	4-4
圖 4-5 現地原生植株高度示意圖	4-5
圖 4-6 現地原生植株根系示意圖	4-5
圖 4-7 苗圃植株高度示意圖	4-6
圖 4-8 苗圃栽植三草種高度淨生長量	4-6
圖 4-9 苗圃栽植三草種高度累積生長量	4-7
圖 4-10 三草種於苗圃與現地根系長度之對照	4-7

圖 4-11 風速 6.3m/s 下不同植株覆蓋度與後緣風速變化之關係.....	4-9
圖 4-12 風速 10.8m/s 下不同植株覆蓋度與後緣風速變化之關係..	4-10
圖 4-13 風速 6.3m/s 下不同植株覆蓋度與風蝕率之關係.....	4-12
圖 4-14 風速 10.8m/s 下不同植株覆蓋度與風蝕率之關係.....	4-12
圖 4-15 三草種之根系分布之情形.....	4-14
圖 4-16 三草種之各土層深度與根面積比之關係.....	4-16
圖 4-17 三草種之各土層深度與根數量之關係.....	4-17
圖 4-18 三草種最大剪力值與位移之關係.....	4-19
圖 4-19 三草種與裸土施加不同正向力與抗剪強度之關係.....	4-20
圖 4-20 三草種抗剪強度增量之差異.....	4-20
圖 4-21 三草種最大拉拔抗力值與位移之關係.....	4-22
圖 4-22 甜根子總根長與拉拔抗力之迴歸關係.....	4-26
圖 4-23 甜根子根長密度與拉拔抗力之迴歸關係.....	4-26
圖 4-24 蘆葦根體積與拉拔抗力之迴歸關係.....	4-27
圖 4-25 蘆葦地上部生物量與拉拔抗力之迴歸關係.....	4-27
圖 4-26 甜根子根徑與植物單根抗拉力之關係及其迴歸曲線.....	4-30
圖 4-27 臺灣蘆竹根徑與植物單根抗拉力之關係及其迴歸曲線.....	4-30
圖 4-28 蘆葦根徑與植物單根抗拉力之關係及其迴歸曲線.....	4-31
圖 4-29 甜根子根徑與單根抗拉強度之關係及其迴歸曲線.....	4-31
圖 4-30 臺灣蘆竹根徑與單根抗拉強度之關係及其迴歸曲線.....	4-32
圖 4-31 蘆葦根徑與單根抗拉強度之關係及其迴歸曲線.....	4-32
圖 4-32 甜根子根徑與單根楊氏模數之關係及其迴歸曲線.....	4-33
圖 4-33 臺灣蘆竹根徑與單根楊氏模數之關係及其迴歸曲線.....	4-33
圖 4-34 蘆葦根徑與單根楊氏模數之關係及其迴歸曲線.....	4-34
圖 4-35 甜根子單根抗拉強度與楊氏模數之關係及其迴歸曲線.....	4-34

圖 4-36 臺灣蘆竹單根抗拉強度與楊氏模數之關係及其迴歸曲線.4-35

圖 4-37 蘆葦單根抗拉強度與楊氏模數之關係及其迴歸曲線.....4-35

第一章 緒論

臺灣位處於亞熱帶季風氣候帶，夏季下雨天數多且在 8、9 月常遭受颱風侵襲，因此夏天溪流常呈現豐水狀況；然而冬天只有北部及東北部受東北季風影響降雨，其他地區若無鋒面來襲則為乾冷天氣，導致冬季時河流常為涓涓細流甚至乾枯無水，產生許多荒溪型的河川。

荒溪型河川在下游河段或出海口時，常因缺水或無足夠水源覆蓋砂地，此時若周遭無植生覆蓋，在東北季風吹襲下懸浮微粒藉此向上揚起，易導致飛砂發生，而大量的飛砂將產生砂塵暴，不但破壞了河道的自然生態系統惡化了生態環境，並造成附近道路能見度下降，危害用路人之行車安全，懸浮微粒濃度亦隨飛砂增加而上升，由於粒徑常小於 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下，若風向剛好為河川源區與附近社區直線方向一致時，將導致社區空氣中的懸浮微粒濃度增加，以大甲溪、大安溪與烏溪為例，飛砂量中的 PM_{10} 約占總體積 2.1-5.8%(黃隆明等，2011)。

砂塵的主要來源為河床上的裸露區域，枯水期時河川水位降低，導致河床裸露，東北季風再將河床上砂土往內陸攜帶造成飛砂現象(陳威廷等，2011)。因主要風向多為北風或東北風，所以飛砂濃度較高位置大多位於河川西南岸地區，使得南岸居民在冬季時飽受揚塵之苦(林德貴等，2012)。

現今在臺灣西部地區，有飛砂揚塵危害的河川有大安溪、大甲溪、大肚溪、濁水溪與高屏溪，東部則為立霧溪、花蓮溪、秀姑巒溪、卑南溪等。目前揚塵抑制主要採水覆蓋(水柱式、水霧式噴水水幕或是梯田式水覆蓋工法)或是綠覆蓋(於河道二側種植防風林)。水覆蓋為因應地形自河川上游處利用導水路引水到裸露高地，藉整地圍堰蓄水使其

流向低處，主要目的在增加河床土砂之含水量，提高飛砂發生難度，優點為可快速改善揚塵現象，但因屬短期防治措施，遇颱風或大雨即沖毀，因此仍需進行綠覆蓋工法，種植樹木及地被植物，以達到長期防制效果。

防風定砂是水土保持局的重要工作課題之一，因此本計畫透過小尺度之縮尺試驗，進行相關試驗及調查分析，以了解三種臺灣常見河濱植物之抗風蝕成效。同時測量其根系生長及植株之抗拉及抗剪能力，以闡釋根土互制行為於防風定砂上之功效。

透過風洞試驗了解不同草種在強風作用下所能發揮之定砂效果，同時分析根系特徵與抗風蝕能力之相關性，了解各草種於河口砂土之生長特性與固結砂土能力。經由植株根系力學試驗分析，以闡釋不同草種植株根系特徵與其生物力學及錨定砂土之特性探討影響定砂之主要因子，以期進一步實際應用於揚塵抑制之植生工程，本計畫執行工作項目檢核如下表 1-1 所示。

表 1-1 計畫工作項目檢核表

項次	工作項目	對應章節
一	植株生長情形 1. 現地植株生長情形 2. 苗圃植株生長情形 3. 現地與苗圃比較	第四章第一節 第一段 第二段 第三段
二	風洞試驗 1. 減緩風速能力 2. 抗風蝕能力	第四章第二節 第一段 第二段
三	根系型態與力學 1. 根系型態 2. 抗剪強度 3. 抗拉拔能力 4. 單根拉伸強度	第四章 第三節 第四節第一段 第四節第二段 第四節第三段

資料來源:本計畫

第二章 文獻回顧

第一節 飛砂形成原因

風蝕作用是風將表層土壤顆粒與其原始空間位置分開的過程，黃隆明等(2010c)認為運動型態大致可分為三種：滾動、跳躍與懸浮(飛揚)，滾動的砂粒粒徑介於 0.5-2 mm 間，主要受重力作用影響，認為滾動狀態的動量並非直接由氣流中獲取，而是砂粒間相互碰撞，藉由碰撞將能量傳遞給其他粒子，引發其進行滾動；而粒徑 0.1-0.5 mm 的砂粒，因風吹產生上揚但本身仍受重力作用之影響，彼此碰撞後彈升至空中，進行跳躍運動，如在運動時能量下降無法繼續進行彈跳則會改為滾動，若遇攔阻形成堆積；粒徑在 0.1 mm 以下主要為懸浮，因砂粒輕加上風吹作用進而懸浮於空中。

第二節 植物與風蝕之關係

近年來國內外學者對植物莖葉及根系-土複合體的室內外試驗研究顯示，植物對防治水土流失、淺層地滑及提高邊坡淺層土體穩定性等方面有顯著作用(周德培等，2003)。

植被覆蓋顯著降低了表層土壤的風蝕，這主要原理為以下三種方式：第一，植被直接覆蓋一定比例的表面來保護土壤免受風的侵蝕。其次，植被直接吸收部分氣流的動能並共同承受剪切力，除了增加表面粗糙度、表面高度與邊界層厚度，更降低尾流區域的風速。最後植被在飛砂運輸過程中直接攔截部分土壤顆粒，並堆積在該處(Wolfe *et al.*, 1993； Van de Ven *et al.*, 1989； Cheng *et al.*, 2020)。

Cheng *et al.* (2020)指出植物改變了原先地表氣流場分布，隨之更改氣流對土表的剪切力。臨界剪切力為發生飛砂所需克服的最小剪切

強度，主要受土壤性質影響，如：砂粒粒徑、組成、水分含量、土壤密度等，對於正常乾燥的砂質土壤，臨界剪切力主要與粒徑相關。具植被覆蓋的表面風蝕率隨風速的增加而上升，隨植被覆蓋率的增加而減小，並隨粒徑的增加而減小。

第三節 植物根系分類與根系力學

一、植物根系分類

植物根系類型依據其分佈形狀可分為 5 類，分別為（a）纖維狀型(fibrous)：根球中具有許多細而傾斜或垂直下降的根；（b）側生型(lateral)：從主根上長出長放射狀散開的根，可能會有兩個或多層，；（c）板塊型(plate)：淺鋪展的根系，表面根系豐富，無主根；（d）主根型(tap)：幼苗的胚根持續存留並長成或多或少垂直的單個或分支的塊狀根，它可能會產生平坦狀側根(Marden *et al.*, 2005； Pohl *et al.*, 2011)。

二、根系力學

根系對土壤內聚力的增強作用是判斷根系固結土壤能力的指標(熊燕梅等，2007)。

(一)抗拉強度

植物根徑與單根抗拉力呈指數型正相關，但與整體抗拉強度為指數型負相關（圖 2-1），原因是與相同根面積比的粗根相比，細根系與土壤有較大的接觸表面積，使摩擦力更強，抗拉能力也較好，此外每單位深度的抗拉強度也隨深度增加，而下降，原因為深度越深單位含根量越少(鐘榮華等，2015；趙麗兵等，2008)。

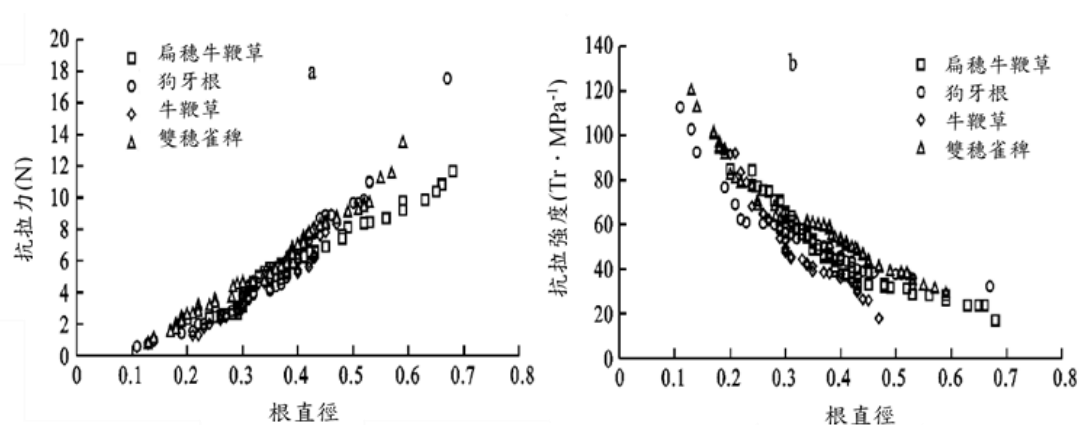


圖 2-1 根徑與拉伸強度及抗拉強度之關係

資料來源：鍾榮華、鮑玉海、賀秀斌、高進長、閻丹丹、李峪、王銘鋒，“三峽水庫消落帶四種草本根系抗拉特性及其根系黏聚力”，水土保持學報，第4期，188-194頁，2015。

(二)抗剪強度

植物透過根系佈滿並深入土壤形成地下根-土壤之複合體，可以提高土壤穩定性，此原理類似鋼筋在混凝土內的效果，可顯著提升抗剪強度(Thornes, 1990；李華坦，2014)。根系增強土壤抗剪強度之原理為：藉由根系與土之界面的摩擦力將土中剪應力轉換為根系拉應力來呈現(Hathaway *et al.*, 1975)。

張興玲等(2013)指出芨芨草(*Achnatherum splendens*)含根量從0增加到 $29.57\text{mg}/\text{cm}^3$ 時，摩擦角 ϕ 值由 23.70° 增加為 27.62° ，增加量 $\Delta\phi=3.92^\circ$ ，內聚力 c 則是 8.500kPa 增加到 55.525kPa ， $\Delta c=47.025\text{kPa}$ ，內聚力相對顯著增加原因為土體內含根量增加，根系的加筋作用因此顯著提升， c 值因此顯著增加，根據結果發現土體抗剪強度的提高主要是內聚力 c 的增加所導致。而楊亞川等(1996)也得到類似結果，同樣認為內聚力 c (土粒與土粒、土粒與根系間內聚力加上從土體剪應力轉換成的抗拔力之和)與含根量呈正相關， ϕ 與含根量相關不大，主要是與含根量增加時根系

錨定力顯著上升有關。趙麗兵等(2008)認為隨深度增加，抗剪強度上升幅度趨緩(表 2-1)，其原因與含根總量隨深度增加而下降有關，也發現根系不僅增強土體的最大抗剪強度，也使最大應變上升，鐘榮華等(2015)在三峽水庫對四種草本植物的研究也得到相同結果。

表 2-1 根系深度與抗剪強度之關係

植物種	0-20cm				0-40cm			
	抗剪阻力(N)				抗剪阻力(N)			
	F_{rmax}	F_{smax}	F_t	$\Delta\tau(kPa)$	F_{rmax}	F_{smax}	F_t	$\Delta\tau(kPa)$
草木樨	2784.00	1375.16	1408.84	8.81	2308.84	1289.32	1019.52	6.37
紫花苜蓿	4033.92	1581.60	2452.32	15.33	2372.30	1261.64	1110.56	6.94
黍	2801.72	1080.36	1721.36	10.76				
冰草	1989.92	1153.44	836.48	5.23				

資料來源：趙麗兵、張寶貴、蘇志珠，“草本植物根系增強土壤抗剪切強度的量化研究”，中國生態農業學報，第3期，第16卷，718-722頁，2008。

第四節 相關揚塵抑制工法及現行法規

一、相關研究文獻

風蝕和揚塵形成的要件主要有兩個前提，土壤表面有可侵蝕的顆粒物，另外風速須達到使顆粒物產生運動的最小閥值。主要可分為物理防治、生物防治和噴灑添加物防治。

(一)物理防治

物理防治常見的有水覆蓋工法、設置風障和砂障(攔砂籬)或表面覆蓋等，主要原理大多是透過減緩風速、改變土壤表層結構或含水率等方式降低風蝕和揚塵之發生。

1. 水覆蓋工法

水覆蓋原理為藉由水分子濕潤粒狀揚塵物表面，使其團結成較大顆粒，並增加其重量，因而導致飛砂運動風速閾值提高。洪祖健等 (2014) 對河床裸露地揚塵抑制工法之效益的研究中指出，如單純只考慮揚塵抑制效果，水幕法可達 68.32% 的抑制效率、60% 的沉浸式水覆蓋可達 44.9%、葉脈式的水覆蓋可達 54.56%，但因每單位面積的各工法成本不同，若將其成本考慮進去葉脈式水覆蓋在這三者中為最佳的治理方式。水覆蓋可達良好治理果，惟其缺點為弱為人工噴水之方式不僅範圍小且可能造成周遭泥濘。

2. 設置風障和砂障

透過放置風障或砂障等設施可藉由材料本身攔截飛砂並使其沉積在材料前方可促進穩定的砂丘建立，幫助植物生長，並降低飛砂產生。Huang *et al* (2014) 以竹子綑綁大型芒草、海洋漂流物(如斷木、竹子等)和竹籬笆，在三種材料配置中，竹籬笆具有最佳的效果，在設置後 1.5 個月後可堆積 50-60 cm 高的砂子，3 個月後可達 80-100 cm 高，在該配置產生的砂丘上種植濱刺麥約 117 天，存活率仍有 42%，覆蓋率從原先 16% 增加到 31%，顯示該治理方法不僅可穩定砂丘避免飛砂產生也可提供後續植物定植良好的場域。

3. 表面鋪設和敷蓋

表面鋪設或敷蓋主要是在地表放置材料避免風直接對砂層造成侵蝕，並且可以減緩地表風速。礫石覆蓋在中國西

北半乾旱地區為流砂固定的措施之一，工程中設置礫石也可以有效防止路基侵蝕，提高邊坡穩定性，劉連友等人 (1999) 的風洞研究結果為在固定的風速條件下，風時速度隨礫石覆蓋度增加呈現指數型遞減變化，此外鋪設方式也會表現出不同結果，從抗風時能力遊最佳到最低分別為：隨機鋪壓 > 分隔號帶鋪壓 > 斜交條帶鋪壓 > 簇狀鋪壓 > 平行條帶鋪壓。

(三)生物防治

1. 防風林

防風林可阻止氣流前進或將地表氣流推升置林帶上方改變其行進方向，但隨林帶背風面水平距離增加，上方氣流隨之下降，因而導致地表風速增加，因此隨林帶背風面水平距離增加，防風效果降低。海岸防風林防風有效範圍約為 13 倍的樹高，與之相比透風率 0.8% 的防風牆有效距離只有 10.5 倍的高度(江永哲等，1988)，如在樹高的 10 倍距離以內，風速可降低約 50% 左右(陳威廷等，2011)。

此外影響防風林效果的還有林帶厚度與林型配置，防風林帶最佳攔砂厚度為 2.5H-3.0H，在不同林型配置中，林帶前段高後段低之混合林，有最佳攔砂成效，在林帶內可攔截高達 90% 的飛砂，此外應避免設置前段低後段高的林型，以免造林林帶前緣氣流形成渦漩形成飛砂(黃隆明等，2014)。

2. 植生地表覆蓋

植物生長在在地表形成一層緩衝層避免風直接侵蝕，此外植生覆蓋與其他風蝕治理方式相比為時效性較長，且具有

改良土壤性質，提高地力的優點。劉剛等 (2007) 在黃河故道的試驗顯示種植牧草之區域與對照組相比風蝕深度下降約 69.62%-80.58%，且植物本身具有減緩風速，降低地表風速功能，減緩風速幅度可達 30.17%~60.31%，惟不同草種抗風蝕能力不同差異顯著，通過植物體阻攔細砂粒並使其沉積達到減緩風蝕之效果。

林德貴等 (2012)對烏溪出海口研究顯示在若在植生時再配合稻草蓆敷蓋使用可將揚塵排放率削減 77%，與該研究的防風網工法(50%)和灑水系統工法(37%)相比有更好的防治效果。

另外，植物枝葉型態及材質也會影響其抗風蝕能力，Lee *et al.* (2020)以濱刺麥、馬鞍藤、蔓荊作為實驗，發現具硬莖和稀疏堅韌的刺葉的濱刺草具有更好的抗風蝕能力能力。

(四)噴灑添加物防治

目前生物膠結和生物聚合物被認為是乾旱或半乾旱地區控制侵蝕的解決方案之一，生物膠結通過尿素水解過程，利用生物特性使 pH 值上升，讓其環境為過飽和之狀態，加上尿素酶陽性菌之存在，讓土壤孔隙中碳酸鈣因此沉澱，生物聚合物是以微生物、植物和其他生物材料所合成之聚合物，如：三仙膠(黃原膠)、瓜爾膠等。

Devrani *et al.* (2021) 表明未經處理的土壤在風洞實驗下，在其砂粒運動的風速閾值下，土壤損失為 8.91%，在風速達 45 km/h 時增加到 75.23%。若採用巨大芽孢桿菌(*Bacillus megaterium*)進行生物膠結，隨其濃度增加砂粒運動的風速閾值也會隨之增加，

甚至在 0.5M 濃度下可承受風速達 45 km/h；利用三仙膠在濃度 0.25%時便可使砂粒運動的風速閾值提升至 45 km/h，並且可形成一層生物性結皮達到保護，然而水溶性生物聚合物暴露在水中時會失去強度，並從土壤中被沖走(Lo *et al.*, 2020)，時效性較為短。

表 2-2 國內外飛砂防治相關彙整表

	主要防治方法	治理成效
洪祖健等 (2014)	1.水幕法 2.池浸式水覆蓋 (20%) 3.池浸式水覆蓋 (40%) 4.池浸式水覆蓋 (60%) 5.葉脈式水覆蓋法 6.縱向植生法 7.橫向植生法	1.揚塵抑制效率 水幕法> 葉脈式水覆蓋法> 池浸式水覆蓋法 (60%)> 橫向植生法> 池浸式水覆蓋法 (40%)> 縱向植生法> 池浸式水覆蓋法 (20%)。 2.揚塵抑制效益 葉脈式水覆蓋法> 水幕法> 橫向植生法> 縱向植生法> 池浸式水覆蓋法 (60%)> 池浸式水覆蓋法 (40%)> 池浸式水覆蓋法 (20%)。
Huang <i>et al</i> (2014)	1.竹子綑綁大型芒草 2.海洋漂流物(如斷木、竹子等) 3.竹籬笆	竹籬笆具有最佳固砂攔砂的效果，在設置後 1.5 個月後可堆積 50-60 cm 高的砂子，3 個月後可達 80-100 cm 高
劉連友等 (1999)	礫石覆蓋	1.礫石覆蓋密度增加時，風蝕速率呈指數遞減變化，相同礫石覆蓋密度下。 2.不同鋪設方式抗風蝕能力由大到小分別是隨機鋪壓> 分隔號帶鋪壓> 斜交條帶鋪壓> 簇狀鋪壓> 平行條帶鋪壓。
江永哲等 (1988)	1.防風牆 2.防風林	1.海岸防風林防風效果最佳，有效距離達 13 倍林高距離。 2.透風率 0.8%的防風牆有效距離只有 10.5 倍的高度。
黃隆明等 (2014)	防風林	1.防風林帶最佳攔砂厚度為 2.5~3.0 倍樹高。

		2.在不同林型配置中，林帶前段高後段低之混合林，有最佳攔砂成效，在林帶內可攔截高達 90%的飛砂。 3.前段低後段高的林型，可能造林林帶前緣氣流形成渦漩。
劉剛等 (2007)	種植牧草	1.種植牧草之區域與對照組相比風蝕深度下降約 69.62%-80.58%。 2.減緩風速幅度可達 30.17%-60.31%。
林德貴等 (2012)	1.灑水系統 2.防風網 3.稻草蓆敷蓋配合植生	揚塵排放削減率由高到低分別為：稻草蓆敷蓋配合植生> 防風網> 灑水系統。
Lee <i>et al.</i> (2020)	以濱刺麥、馬鞍藤、蔓荊作為植生覆蓋	抗風蝕能力由高至低為濱刺麥> 馬鞍藤> 蔓荊。
Devrani <i>et al.</i> (2021)	1.以巨大芽孢桿菌 (<i>Bacillus megaterium</i>)進行生物膠結 2.以三仙膠進行生物聚合	1.濃度增加砂粒運動的風速閾值也會隨之增加，甚至在 0.5M 濃度下可承受風速達 45 km/h。 2.利用三仙膠在濃度 0.25%時便可使砂粒運動的風速閾值提升至 45 km/h，並且可形成一層生物性結皮。

二、臺灣現有治理方案

上述各工法皆有其優缺點和其限制，如物理防治和添加劑防治可以快速且有效的解決飛砂問題，但在施以工法後僅能對飛砂產生抑制而非解決飛砂來源—裸露地的問題，而防風林與植生覆蓋雖然可以解決該問題，但在種植前需要先建立較穩定的砂丘供其生長避免根系裸露死亡，另外在達到目標治理成效的等待時間較其他工法來的漫長。

目前各河川局主要採用的治理方法有水覆蓋、綠覆蓋、鋪設稻草蓆及防塵網等，且近年來逐漸因應各自管轄河川之特性採用適合之工法。

這些現地治理結果也提供後續相關防治飛砂做為參考，甚至有些已建立標準作業流程，以濁水溪為例目前建議選用草種為具有貼地性、走根性、匍匐性特性，例如蘆竹、甜根子、鼠尾草、蘆葦等，在後續生長過程須配合簡單之澆水與養護工作可提供其存活率，若執行順利可抑制上風處約 56% 的揚塵量，有效距離可達 30 m，考量到中、長期治理配合木本植物共同施種，待木本植物(如：黃槿)具飛砂防治效果時可抑制上風處約 81% 揚塵，有效距離至少為 60 m(經濟部水利署，2011)。

第八河川局 (2008) 根據國內外飛砂防治經驗、飛砂發生影響因子與機制、不同飛砂治理優缺點及其適用性等，擬定卑南溪河口的飛砂防治策略，該策略為綜合性且具有短、中長期不同建議防治方案。

治理分區主要分為利吉層裸露岩壁、利吉河床、市區海岸和河口浮洲。利吉層裸露岩壁建議治理方法為裸露坡面植生與邊坡基腳穩定工程，減少飛砂來源；利吉河床之特性為上游右岸高灘具較大之風積砂丘，短期防治辦法為施種可隨水流散布之草種，如百慕達草、百喜草、假儉草和類地毯草。在河床內生長減少揚塵來源再輔以噴灑水霧之設置提高阻卻揚塵效率，長期而言須建構複層結構之防風林，可採用黃槿、水黃皮和木麻黃等；市區海岸周遭飛砂多來自海岸砂灘地，砂丘較為短，採用在高灘地區編籬地砂並進行植生，並在其後方建立複層結構之防風林；隨不同季節河川流量有所差異，河口浮洲揚塵的變動性較大，並且具有較大砂丘，短期內防治策略與利吉河床相同採

可行水利散播之草種再搭配噴水系統，隨後建築複層結構防風林與延伸噴水設備，並將原先短期植生拓展建置和加強其管理。

在防治效果評估方面，經濟部水利署 (2016) 對於 2010-2015 年間中央管轄的河川揚塵改善評估結果顯示第一河川局主要採用狼尾草、甜根子草與其他蘭陽溪原生草種進行綠覆蓋工法，其治理的蘭陽溪 PM_{10} 濃度從期間降低 35.95%；第三河川局以截砂石籬、防塵網為主，其治理的大安溪、大甲溪以及烏溪分別下降 10.76%、4.10%和 17.17%，且發現在大安溪及烏溪地區裸露地面積減少，水覆蓋面積增加；第四河川局以水覆蓋與採用牧草、狼尾草進行綠覆蓋為主，雖然其治理的濁水溪 PM_{10} 濃度在期間內有些微增加，但在空氣不良日數僅在 2013 年出現 1 天；第七河川局以施種狼尾草為主，其管轄高屏溪下降幅度約 15.70%；第八河川局在卑南溪主要以梯田水覆蓋為治理手段，在臺東仁愛國小測站所得之 PM_{10} 測值皆低於 $25\mu g/m^3$ 、第九河川局以河道整理搭配植栽植五節芒和狼尾草為主，其負責之花蓮溪和秀姑蘭溪皆有控制，甚至在部分測站低於 $25\mu g/m^3$ ，顯示治理皆有成果。

表 2-3 臺灣治理飛砂之應用方法及成效

	主要防治方法	治理成效
第一河川局	栽種狼尾草、甜根子草與其他蘭陽溪原生草種	蘭陽溪 PM ₁₀ 濃度從期間降低 35.95%。
第三河川局	截砂石籬、防塵網	大安溪、大甲溪以及烏溪 PM ₁₀ 濃度下降 10.76%、4.10%和 17.17%，且發現在大安溪及烏溪地區裸露地面積減少，水覆蓋面積增加。
第四河川局	1. 水覆蓋 2. 栽植牧草、狼尾草、甜根子、蘆葦、蘆竹和黑麥草等	空氣不良日數僅在 2013 年出現 1 天。
第七河川局	採綠覆蓋施種狼尾草	高屏溪 PM ₁₀ 濃度下降幅度約 15.70%。
第八河川局	1. 梯田水覆蓋 2. 使用水流放流百慕達草、百喜草、假儉草和類地毯草等草種	PM ₁₀ 測值皆低於 25 μ g/m ³
第九河川局	河道整理搭配栽植五節芒和狼尾草覆蓋栽種	部分測站低於 25 μ g/m ³

三、現行法規

因目前《河川管理辦法》37 條規定：「在堤腳、防洪牆、護岸或堤防附屬構造物臨水面 20 公尺內之區域為禁止種植區域，而草本、蔓藤植物之植株及灌木之成木高度低於五十公分且未設置支持之棚架者並不再此限制之內」，因此在施作相關植生工法時須注意其合法性。

在構造物附近禁止種植區，物種選擇應選用草本、藤本類植物或成木高度不足 50 cm 者，以符合現行法規，在遠離構造物時物種選擇即可採用有利達成或迅速完成整治目標物種為優先，採分區種植不同類型物種，較容易在整治目標與法規兩者間取得平衡。

第三章 工作執行方法與步驟

本計畫之工作試驗設計主要分為根系形態分布與力學試驗、風蝕試驗及試驗資料統計分析三大項。根系形態分布與力學實驗可探討各植株生長與根系分布狀況，並可在力學試驗得知各物種可提供之力學錨定能力，剪力試驗、拉拔試驗與根系型態與分布調查重複組數皆為 12 組，單根力學試驗每物種跟段試驗數量至少 150 根，可避免後續實驗極端值影響其整體趨勢；風蝕試驗透過 2 種風速(6.3 m/s 和 10.8 m/s)，三種實驗草種(甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦)及 4 種植物覆蓋率(0 %、20 %、40 %及 60 %)三種因子的組合，在重複組數 10 組的 5 分鐘風洞實驗中觀察風速變化與飛砂量差異(圖 3-1)，可得知其抗風蝕能力。各試驗結果在分析三種試驗草種差異時，皆採用單因子變異數分析(One-way ANOVA)，另外現地實驗中的根系型態與分布調查在完成後將會與苗圃種植者進行比較了解兩者生長是否有差異，了解實驗和實際應用時之差距。

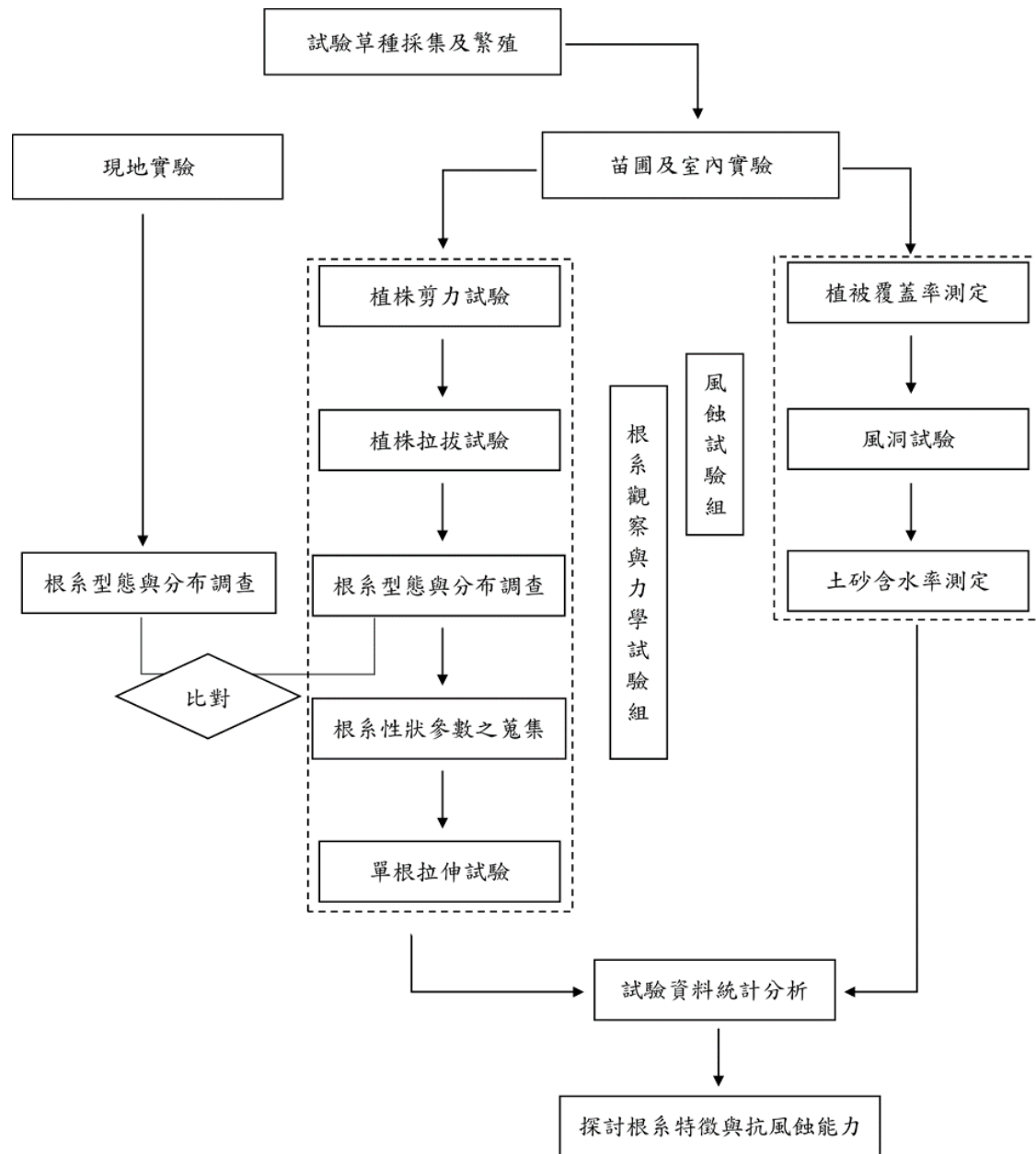


圖 3-1 工作流程圖

第一節試驗草種採集及繁殖

本研究採用的砂土收集自嘉義縣好美里，粒徑分布約有 98.8% 為砂，粒徑分布範圍在 0.07 mm-0.5 mm 間(表 3-1 及圖 3-2)。而草種選定則採用八掌溪沿岸常見優勢物種，在較靠近阿里山河川上游裸露地部分則是有臺灣蘆竹之分布，中游為甜根子草為優勢，蘆葦則是在出海口附近耐鹽的常見草種，分別採集自阿里山 161 林班地及嘉義縣八掌溪及朴子溪河口 (圖 3-3)，將植株採回至嘉義大學森林系苗圃網室進行扦插繁殖，種植於長 50cm、寬 17.5cm、高 14cm 之植物生長槽內，定期澆水並觀察其生長狀況，待植株根系生長較為良好(約 1.5 個月)，將植株並分為根系觀察與力學試驗組及風蝕試驗組並繼續繁殖。

根系觀察與力學試驗組係將植株栽植於長 30cm、寬 30cm、高 60cm 之木箱中，每箱種植 1 株，每一草種 24 箱，生長時間為 6 個月，以達到直剪試驗所需最少深度 30 cm。

風蝕試驗組係將植株栽植於長 20cm、寬 17.5cm、高 14cm 之生長槽中，每箱種植約 50 株，使其繼續生長，每一草種 12 箱，生長時間約為 4 個月，使植株覆蓋率達到最高且不再變動即可開始進行風蝕試驗。

另外，為考量現地可能狀況及研究計畫成果之實用性，選擇八掌溪(23.4622°N, 120.4717°E)進行三種草種之現地栽植試驗，以觀察現地生長及根系分布情形，設置兩大樣區，樣區大小為 2 m×2 m 的方形，每一大樣區內皆有 4 小樣區，小樣區尺寸為 1 m×1 m，各小樣區內皆有種植三種草種，因此各草種在現地皆會栽植 8 棵(圖 3-4 和圖 3-5)。

表 3-1 試驗砂土粒徑分布表

粒徑分析(%)				土壤分類	比重
Gravel	Sand	Silt	Clay	SP	2.64
0.0	98.8	1.2	0.0		

資料來源：本計畫

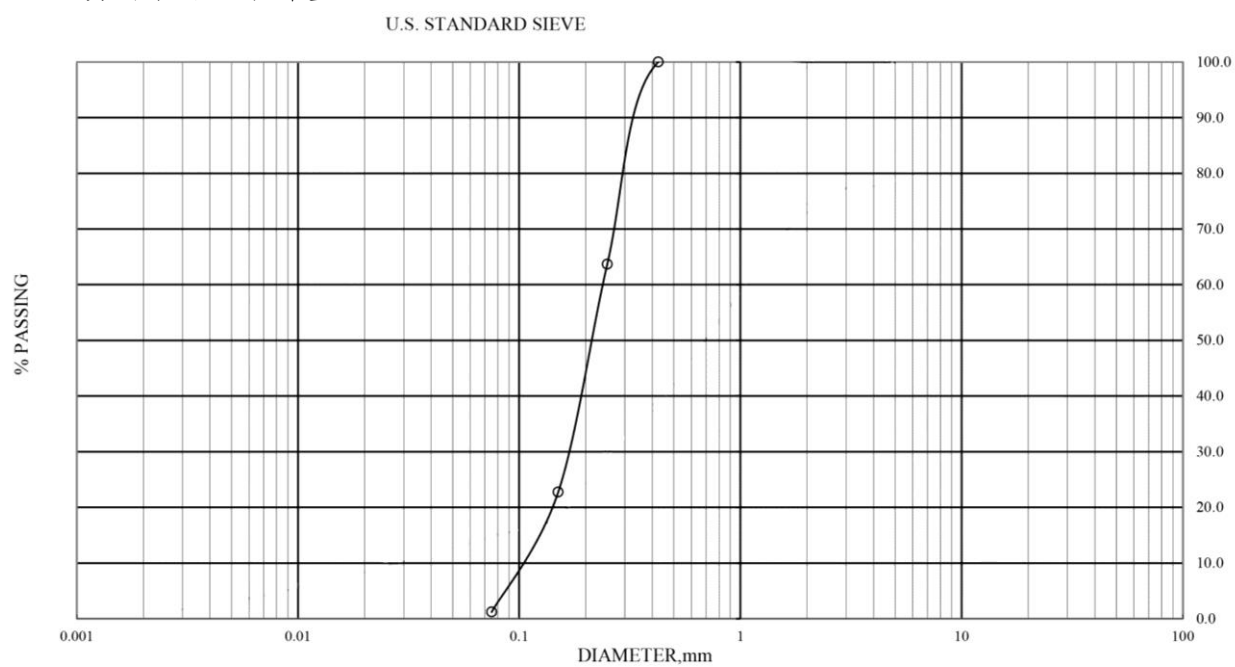


圖 3-2 八掌溪樣區之砂土粒徑分布圖

資料來源：本計畫



圖 3-3 計畫草種採集示意圖



圖 3-4 計畫之現地栽植樣區

河

A B C	B C A	B C A	A B C
C A B	A B C	C B A	C A B

A：甜根子草、B：臺灣蘆竹、C：蘆葦

圖 3-5 現地樣區植株分布圖

第二節根系觀察與力學試驗組

一、植株剪力試驗

每種草種剪力試驗樣本數皆為 12 棵，在試驗開始前，先用游標尺(精度 0.01mm)測量各樣本之根頸直徑(root collar diameter)，以捲尺(精度 1mm)測植株高。從距基部 10 公分處將其地上部截斷，隨後將樣本移至植生剪力試驗機(U-Soft USPD-004, U-Soft Technology Co., Taipei, Taiwan，精度 0.01kg，最大剪力 1,000kg)(圖 3-6)內，再將荷重計調整放置於試驗箱 30cm 高處，隨後開始進行試驗，量測根系之最大剪應力及位移，待之後統計分析時，以 Excel 2016 線性回歸法進行迴歸分析，最後將植株地上部帶回實驗室，放入烘箱以 75℃烘乾至恆重，供計算生物量之用。

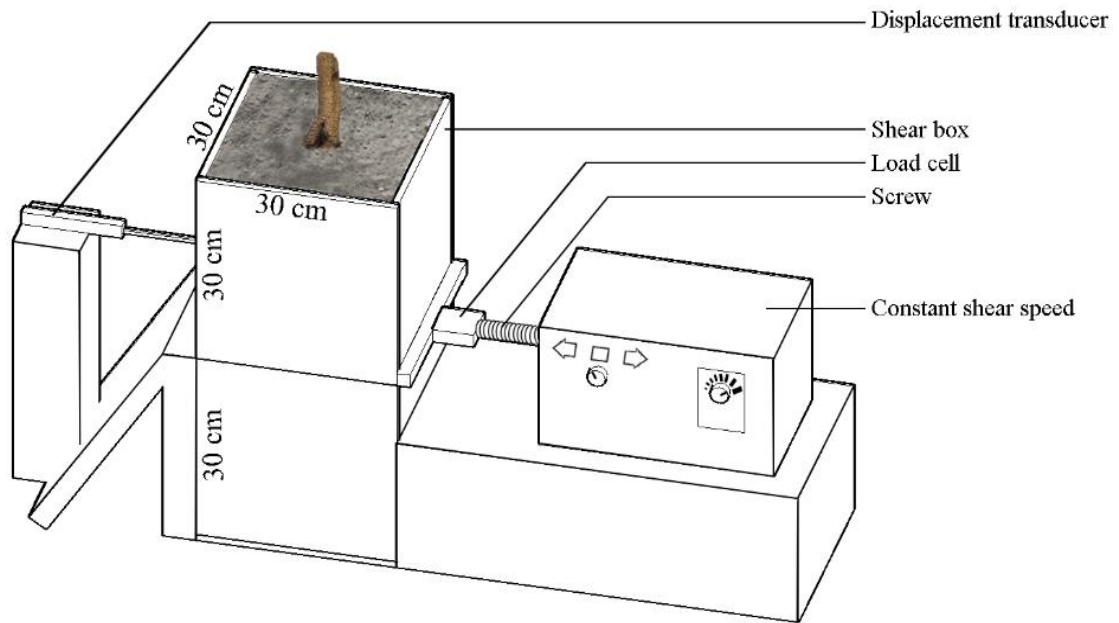


圖 3-6 植生剪力試驗儀

資料來源：本計畫

二、植株拉拔試驗

拉拔試驗樣本為每草種各 12 棵，將樣本置於植生拉拔試驗機(U-Soft USPA-003, U-Soft Technology Co., Taipei, Taiwan，精度 0.01kg，最大拉力 500kg)下 (圖 3-7)，以夾具鎖緊根基處以利後續套上荷重強度 2T 之鋼索並連接上 100kg 之荷重計進行拉拔試驗，測量該植株之最大拉拔抗力(maximum pullout resistance)，再以 Excel 2016 線性回歸法進行迴歸分析。

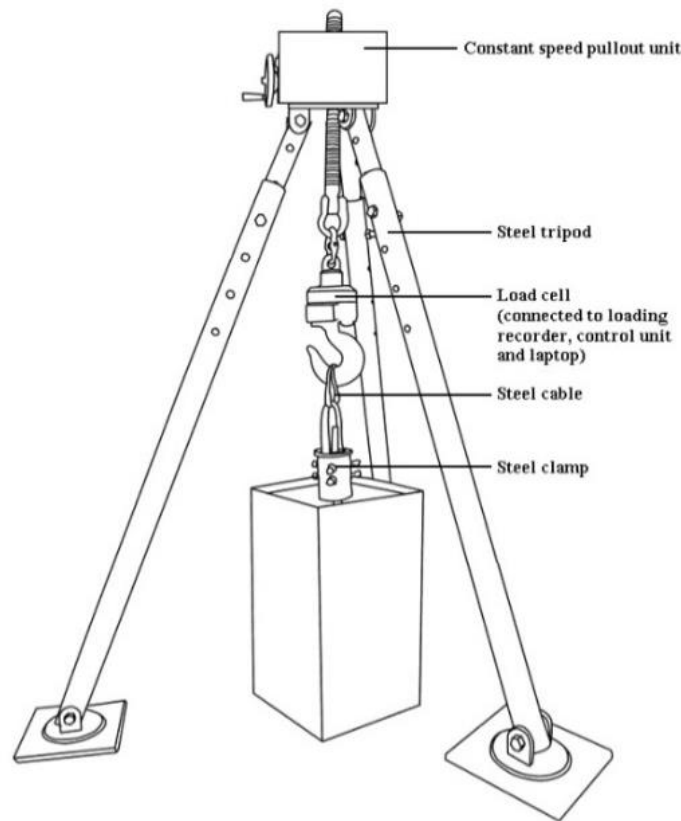


圖 3-7 拉拔試驗儀

資料來源：本計畫

三、根系型態與分布調查

三種草種各 12 棵的樣本觀察方法皆採用全根開挖法(圖 3-8)，將樣本植株的木箱拆開，用水柱沖洗將植株的地下莖與根部小心取出，並以水柱清洗其根系間殘留之砂土，避免雜質殘留於植株根部周遭影響後續生物學特徵之判釋。隨之，攜帶回實驗室進行拍照記錄其全貌，以利後續 WinRHIZO (Regent Instruments Inc., Canada) (圖 3-9)軟體分析計算其根長、根表面積及根毛數量，最後利用照片製成根系側視圖，並採用排水法量測根體積。隨後記錄根系之水平與垂直分布情形，計算根面積比(root area ratio, RAR)以呈現單位土壤面積內根系面積之比值，並顯示不同深度土壤之根系截面積量。具體流程為先將根系進行分層，每 5cm 為一層，隨後以游標尺進行量測根徑，並求取該層總根

系截面積(A_r)，再除以該層土壤面積，其值即為根面積比。將每株根系樣本，逢機取樣並分為三種不同直徑級(0-1mm, 1-2mm, 超過 2mm 以上)，每株各徑級皆取 10 段根，並將所有根切成 6-8cm 保存於 75% 酒精之夾鏈袋，以維持其含水量並避免菌類滋生，接著放置於 4℃ 冰箱中保存，以備後續單根拉伸試驗使用。



圖 3-8 全根開挖法示意

資料來源：本計畫

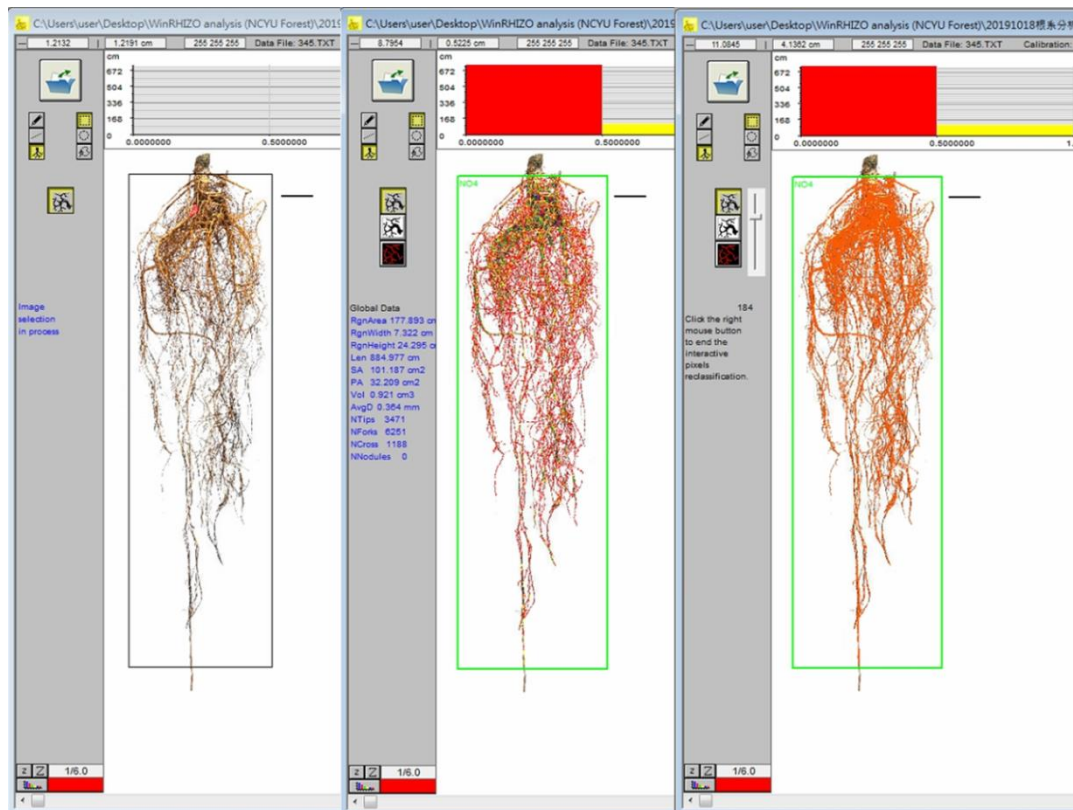


圖 3-9 WinRHIZO 軟體操作介面

資料來源：本計畫

四、根系性狀參數之蒐集

根生物量之取得係將植株之根置入烘箱中，以 75℃ 烘乾至恆重為止，再秤取其重量，將所得數據與先前根系形態與分布調查結果和 WinRHIZO 分析結果進行計算，取得以下數值：根質量密度(root density, RD)、根長密度(root length density, RLD)、根組織密度(root tissue density)、比根長(specific root length, SRL)與比根面積(specific root surface area, SRA)，並將這些數值與拉拔抗力和剪切力以 Excel 2016 線性回歸法進行迴歸分析。

五、單根拉伸試驗

單根試驗樣本分為三種不同直徑級(0-1mm, 1-2mm, 超過 2mm 以上)，每株各徑級皆取 10 段根，試驗前需先測定每單根之濕重，接著

置於單根拉伸試驗機(U-Soft USPT-003, U-Soft Technology Co., Taipei, Taiwan, 精度 0.01kg, 最大拉力 500kg)(圖 3-10)之夾具中, 試驗相關參數設定為: 拉力速度 4.7mm/min, 拉距 5cm, 隨後進行拉伸試驗取得破壞點之最大抗拉力值與拉伸量, 並以游標尺量測破壞點之直徑, 數據將做為計算單根抗拉強度與楊氏模數之用, 最後數據將以 Excel 2016 線性回歸法進行迴歸分析。

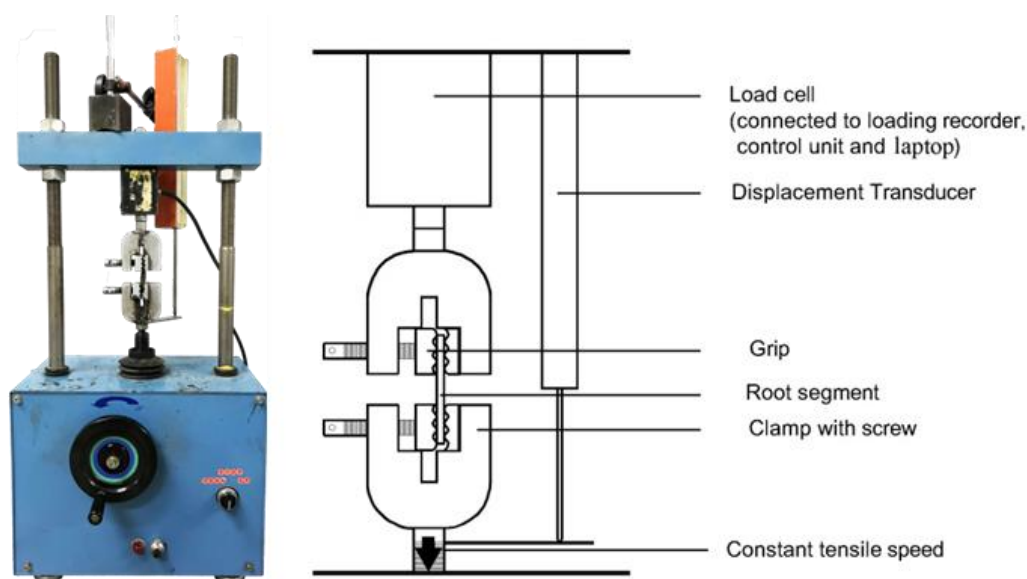


圖 3-10 單根拉力試驗儀

資料來源：本計畫

第三節風蝕試驗

一、土砂含水量控制及測定

因林信輝與江永哲(1979)研究指出砂土含水率小於 1.2 %時, 在相同風速條件下飛砂量與含水率無關。因此在風蝕試驗前 1-2 個禮拜會停止澆水(視天氣狀況調整), 使土體含水量下降, 並在試驗前以乾砂將風蝕箱表面鋪平可避免不同風蝕試驗箱砂土量不同之問題, 試驗前須確定試驗箱表層 8-10 cm 砂土之含水率擬控制在 1~1.2%, 以避免含水率不同影響風蝕結果。

含水率測定方式為取砂土 100g 置入烘箱中以 105℃烘乾 48hr，待砂中水份完全蒸散後，取出秤重，原砂重與烘乾砂重之差值即為水份含量。

二、植被覆蓋度測定

將目標草種種植於長 63cm、寬 22cm、高 18cm 之生長槽內並控制其生長密度，以建立 0%、20%、40%和 60%的植被覆蓋率(表 3-2)。在試驗前，以正攝影方式進行拍照，並輔以 Image J 軟體(圖 3-11)分析以確定各草種於生長槽內之植被覆蓋率。

表 3-2 不同植株覆蓋度分布狀況

甜根子草	臺灣蘆竹	蘆葦
		
植株覆蓋度 20 %	植株覆蓋度 20 %	植株覆蓋度 20 %
		
植株覆蓋度 40 %	植株覆蓋度 40 %	植株覆蓋度 40 %
		
植株覆蓋度 60 %	植株覆蓋度 60 %	植株覆蓋度 60 %

資料來源：本計畫

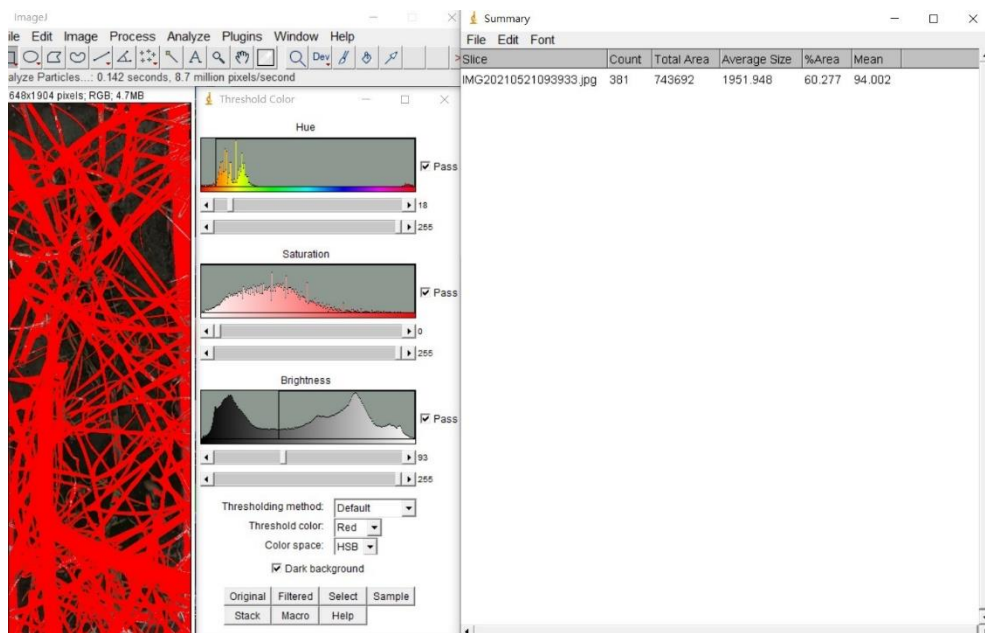


圖 3-11 Image J 軟體操作介面

資料來源：本計畫

三、風洞試驗

風洞試驗範圍為：長 6m、寬 1m、高 1.3m，風洞口之風速 14.2m/s，試驗前先將已確認過植被覆蓋率之植物生長槽置於風洞口後，以進行試驗(圖 3-12 和圖 3-13)。因本計畫採用之砂土粒徑分布範圍在 0.07 mm-0.5 mm 間，根據黃隆明等 (2020) 研究指出粒徑在 0.25-0.42 mm 的飛砂運動起始風速為 7 m/s，另外臺灣海岸地區因地形平坦，在無障礙物阻擾下，風速可達 10~15 m/s 之間，綜合上述兩原因，將實驗風速條件訂定為 10.8 m/s 和 6.3 m/s。

試驗時，將植物生長槽分別放置於距離風洞口前 41 cm(風速 10.8 m/s)和 73 cm(風速 6.3 m/s)處，以風速計(Tecpel 712，泰菱電子儀器公司，臺北，臺灣)量測 5 次風速，用以計算試驗平均風速，並將壓克力材質的水平式集砂盒(長 80cm×寬 30cm×高 20cm)放置於箱後以收集風蝕所產生之飛砂，並測量植被前緣及後緣之風速差。

單次試驗時間為 5 分鐘，且需重複 10 次，每次結束後需將生長槽內土砂填補至相同高度方可繼續試驗，以確保試驗準確性。最後藉由不同草種、植被覆蓋率及風速等三種因子的組合，觀察風速變化與飛砂量及風蝕率(每單位時間下的單位面積內風砂重量即為風蝕率(Q ， $\text{g}/\text{m}^2\text{-sec}$))之差異，並統計分析各草種之抗風蝕能力。

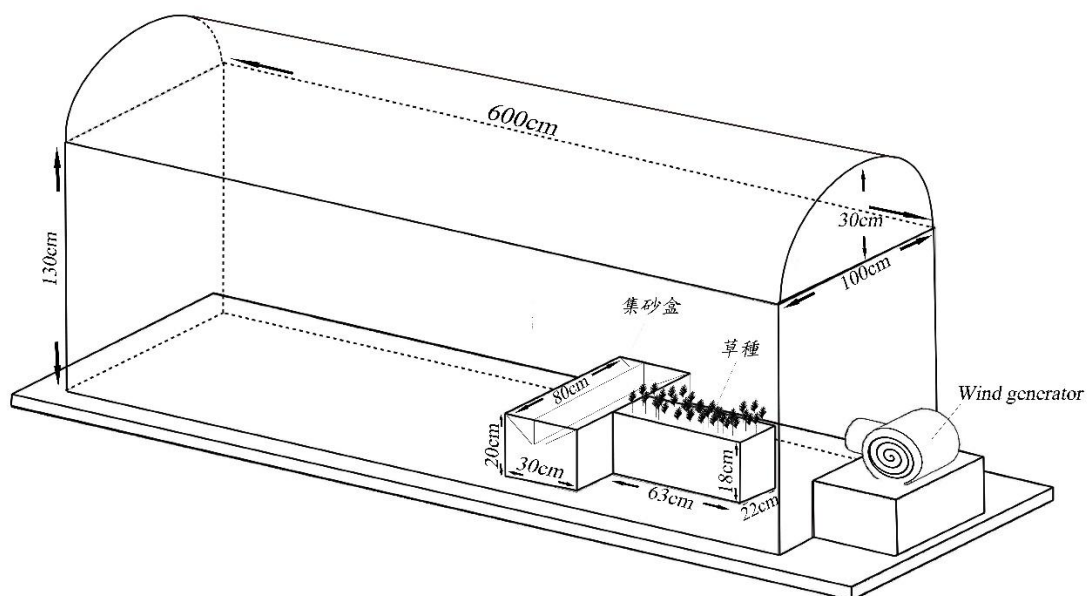


圖 3-12 風洞試驗示意圖

資料來源：本計畫

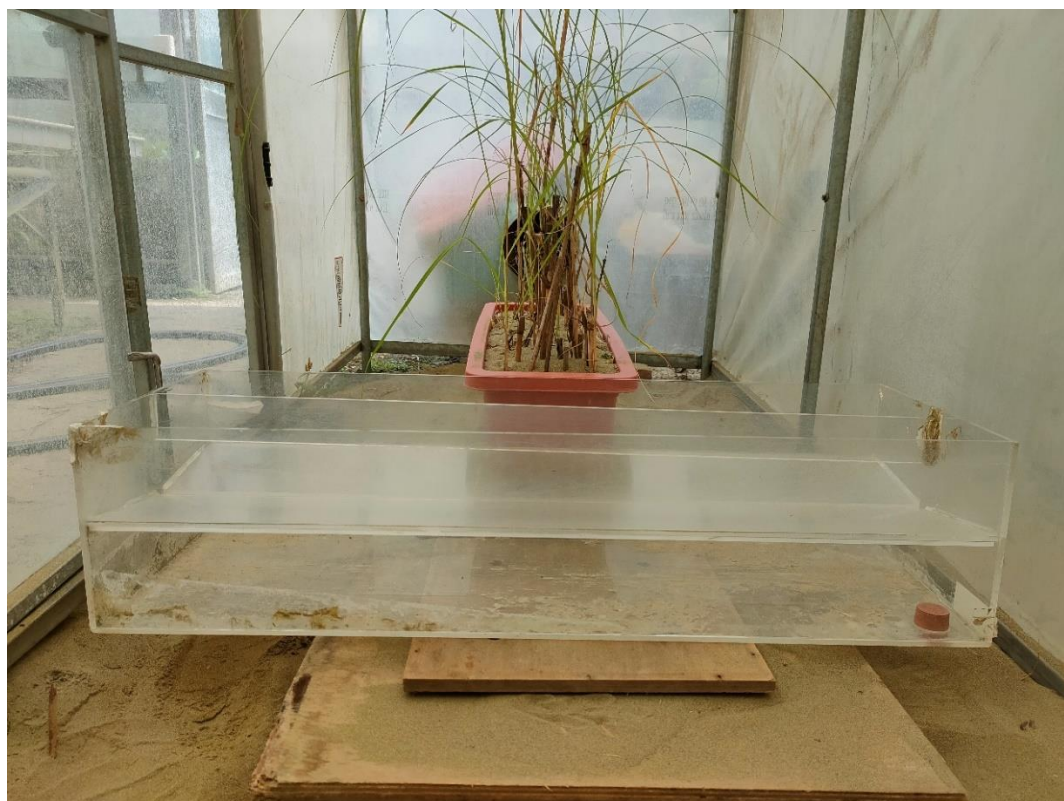


圖 3-13 風洞實驗實際配置圖

資料來源：本計畫

第四節 試驗資料統計分析

研究主要以 Excel 2016 及 SPSS 22 統計分析軟體執行資料整理與分析，Excel 主要用在資料整理、參數計算、表格及繪圖製作及迴歸分析等；SPSS 22 分析方法採用單因子變異數分析(Anova)分析各物種間之結果差異。

第四章 結果與討論

第一節 植物生長試驗

一、現地栽植

第一次現地栽植從 2021 年 5 月 5 日開始(圖 4-1)，在 5 月 21 日時發現第 1 大樣區的第 4 小樣區內甜根子和蘆葦有枯死情形，其餘皆生長良好，原先預計在每個月 5 日測量並記錄植株生長狀況用以跟苗圃根系觀察組之植物進行比較，但因 5 月 30 日至 6 月 4 日間多日大雨，導致八掌溪水位上升過高，將試驗地淹沒，在 6 月 5 日水位退去後調查確認原先種植草種皆被沖毀。



圖 4-1 現地植物生長之情形

有鑒於此次經驗，在第二次現地栽植時將現地樣區往高處進行調整，種植位置為 5 月 30 日至 6 月 4 日間河川水位最高處上方約 1 m 處，以避免因豪雨水位暴漲使得試驗失敗。第二次現地栽植在 6 月 30 日進行，因試驗腹地較原先窄小不足以設置兩個大樣區進行觀察，故將大樣區數量修改為 1 個，尺寸仍然維持 2 m×2 m 的方形，內有 4 小

樣區，小樣區尺寸為 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，各小樣區內皆種植三種草種(圖 4-2、圖 4-3)。



圖 4-2 第 2 次樣現地栽植區實際圖

河

B		C	
A	C	A	B
B		A	
C	A	B	C

A：甜根子草、B：臺灣蘆竹、C：蘆葦

圖 4-3 第 2 次現地栽植樣區示意圖

表 4-1 現地栽植植物基本資料

	第 1 次現地種植			第 2 次現地種植		
	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦
高度 (cm)	39.81±8.82	16.04±1.81	13.56±1.78	74.63±13.52	18.58±1.88	35.48±3.27
基徑 (mm)	2.32±0.32	1.51±0.14	1.54±0.19	2.97±0.46	1.65±0.09	2.13±0.48
根長 (cm)	7.61±0.99	11.09±1.30	6.96±0.37	9.63±1.57	10.90±1.53	10.00±0.93

第 2 次現地種植時仍遭遇暴雨，導致河水暴漲夾帶大量砂土將原先種植試驗地淹沒，因此相關生長數據時間只有 4 周，在此期間內發現臺灣蘆竹和蘆葦在生長初期生長較為趨緩，待 2 周後生長則開始提高，甜根子整體在初期並無明顯移植後的適應問題，惟其中一棵植株在初期有明顯適應不良之情形且葉部有枯萎，這也導致在後續第 3 周時甜根子的累積生長量有下降之情況。

本研究亦額外在甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦三草種之採集地，觀察記錄其野外植株生長之狀況，甜根子高度約可達 4.2 m，臺灣蘆竹約在 1.1 m 左右，蘆葦高度則在 1.9 m 附近；根系方面，因現場植株根系長，且用圓鋤挖掘容易將其鏟斷導致採集困難，因此在根系調查部分甜根子採集約 75 cm，臺灣蘆竹長度約略 100 cm，蘆葦則為 50 cm，但此長度並非野外三草種根系所能達到之極限，因此不可直接用來當作甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦根系長度之上限，但仍可說明本研究採用之三草種根系分布深，詳表 4-2 所示。

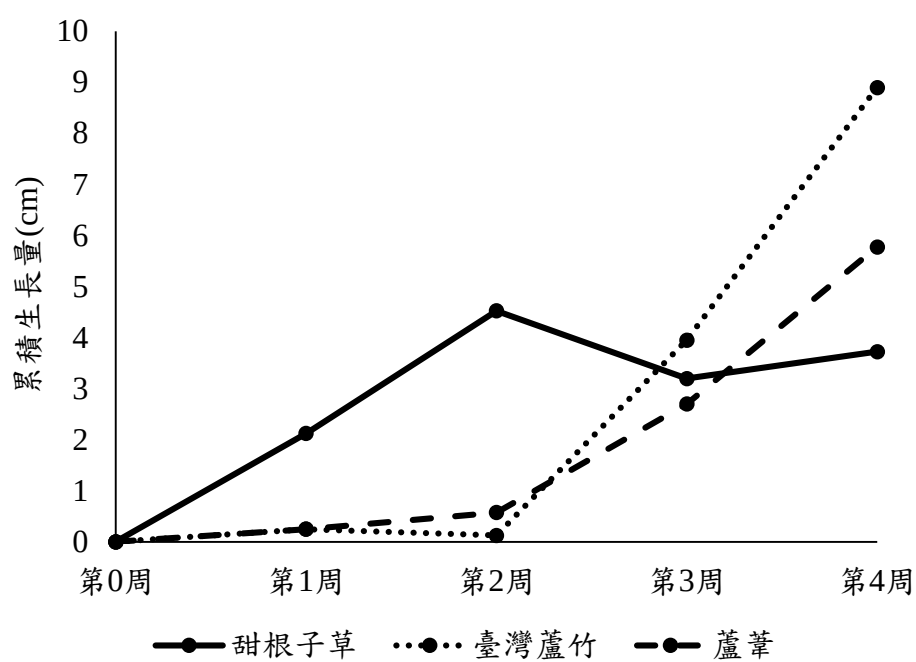


圖 4-4 三草種第 2 次現地之累積生長量

表 4-2 現地植株生長調查結果

	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦
植株高(m)	4.2	1.1	1.9
根長(cm)	75	100	50

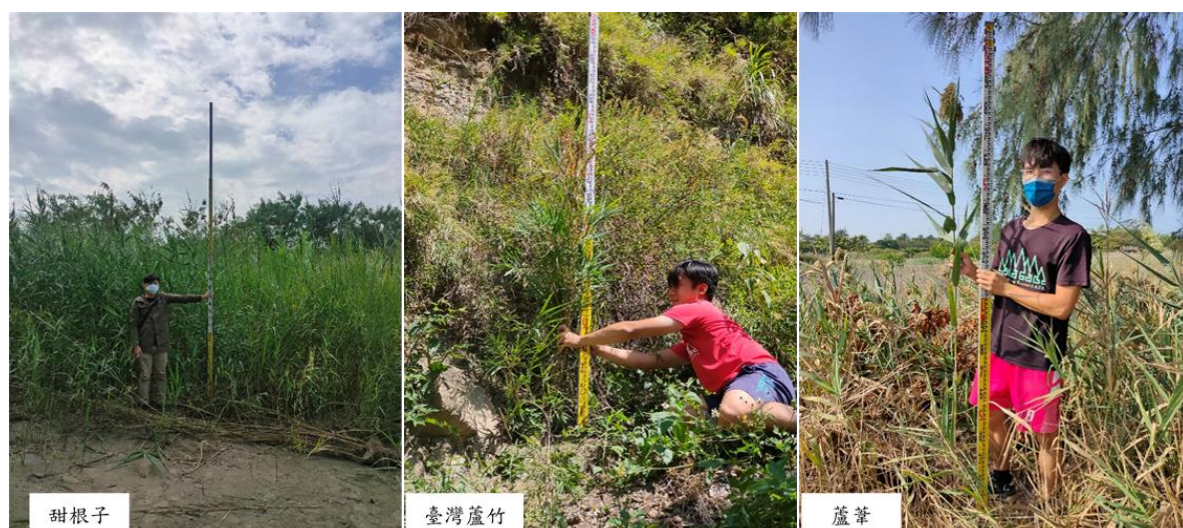


圖 4-5 現地原生植株高度示意圖

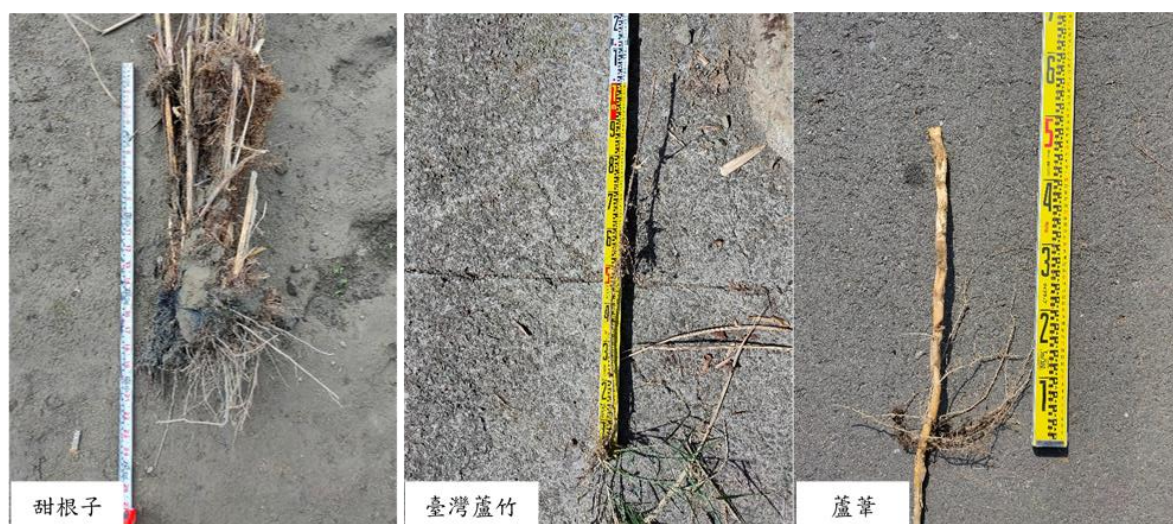


圖 4-6 現地原生植株根系示意圖

二、苗圃生長狀況

種植於苗圃內供後根系力學及根系觀察之草種，三種草種生長情形良好(圖 4-7)，其淨生長高度及累積生長高度皆有明顯增加(圖 4-8、圖 4-9)。甜根子草增加量尤為明顯，從原先平均植株高 45.08 cm 增加為 353cm，6 個月內增長 307.92cm(表 4-3)；植株高度生長速率方面，甜根子最佳，蘆葦次之，臺灣蘆竹則為最緩。另根系生長方面，

甜根子草增加量亦比臺灣蘆竹和蘆葦高，6 個月內根長增長 112.21 cm。



圖 4-7 苗圃植株高度示意圖

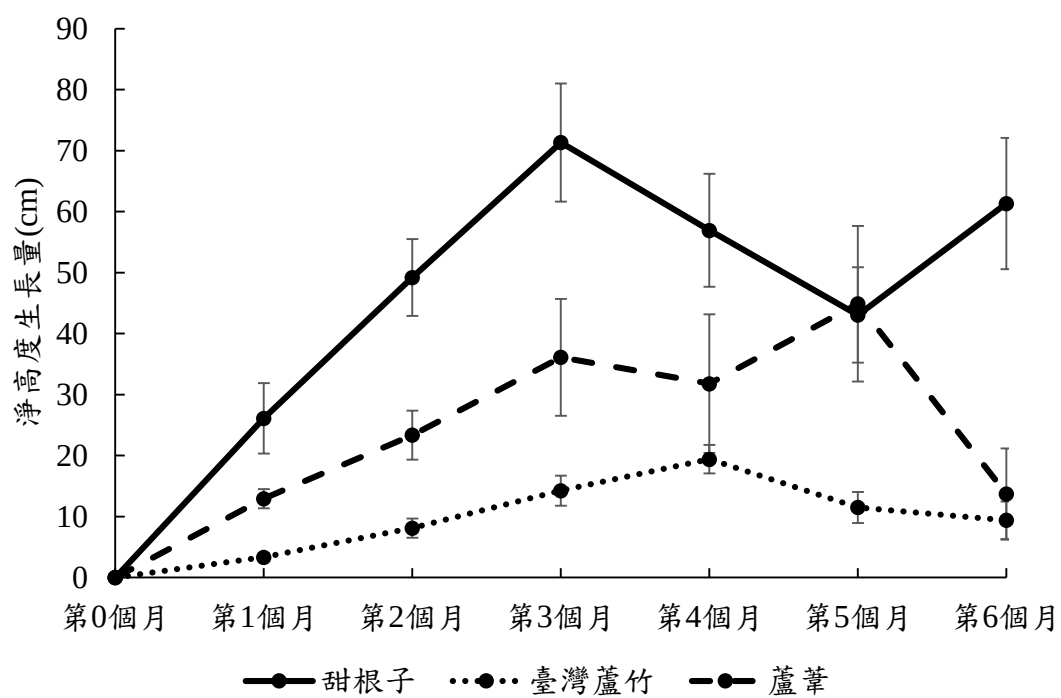


圖 4-8 苗圃栽植三草種高度淨生長量

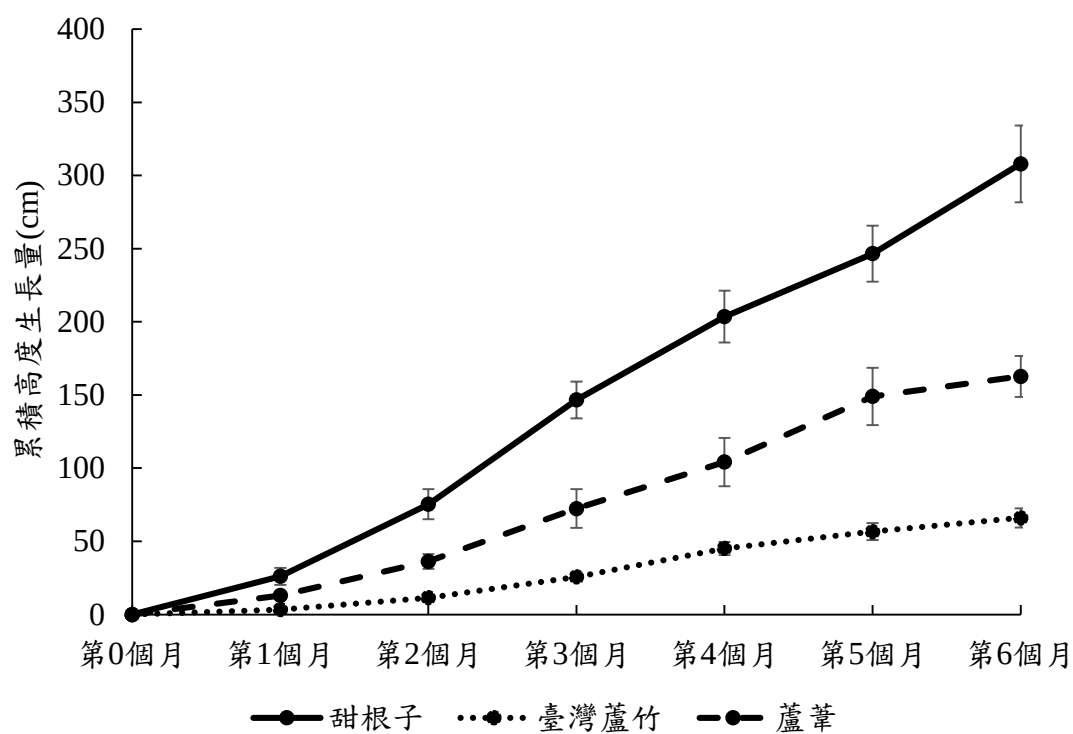


圖 4-9 苗圃栽植三草種高度累積生長量

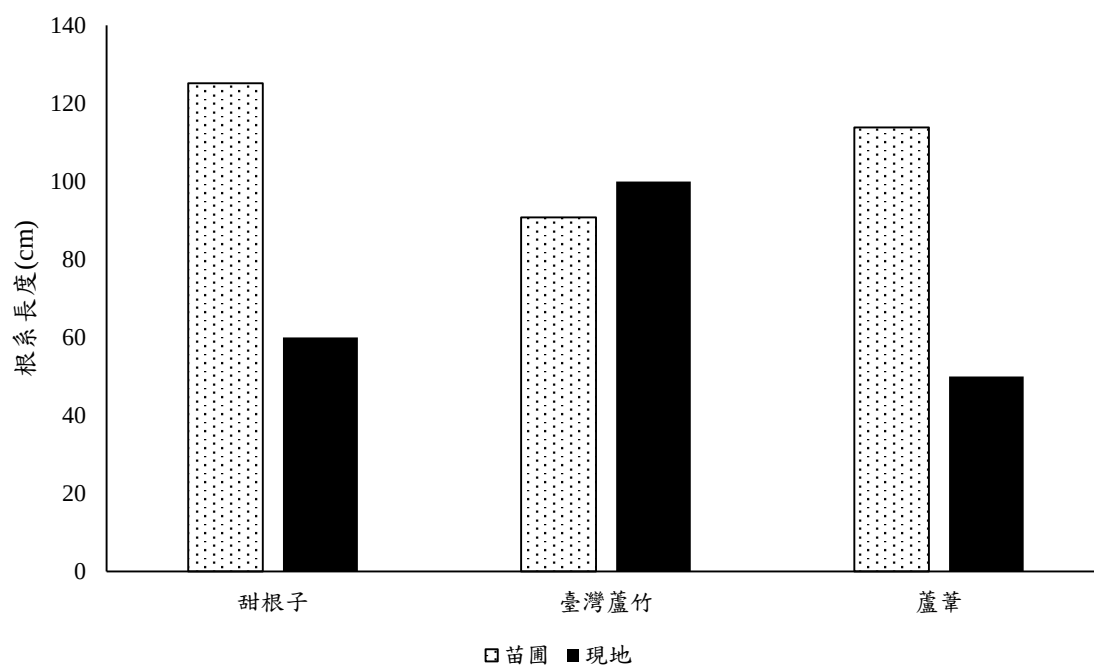


圖 4-10 三草種於苗圃與現地根系長度之對照

表 4-3 苗圃栽植生長試驗調查成果

	生長 0 個月			生長 6 個月		
	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦
高度 (cm)	45.08±7.45	11.25±1.89	15.17±3.12	353±27.63	77.21±6.76	177.92±13.14
基徑 (mm)	2.57±0.38	1.76±0.21	2.23±0.24	11.45±0.55	5.75±0.43	6.83±0.55
根長 (cm)	12.38±1.42	9.46±1.36	4.64±0.58	125.17±4.63	90.79±10.24	113.88±7.39

三、現地與苗圃比較

甜根子現地生長高度約可達 4.2 m，苗圃則約為 3.53 m；臺灣蘆竹現地約在 1.1 m 左右，苗圃為 0.77 m；蘆葦於現地生長，高度則在 1.9 m 附近，苗圃生長為 1.7 m，可發現在野外生長之類別生長狀況較苗圃來的好，若以野外生長之高度作為三草種成熟植株之高度，可發現種植於苗圃生長 6 個月之草種，也接近成熟階段。

現地根系調查根系挖掘困難，易使根系斷裂，但仍至少有 50 cm 以上，因臺灣蘆竹現地根系挖掘完整，故將其與苗圃種植者比較，發現其長度差異不大，推測在根系生長方面臺灣蘆竹 6 個月的生長期可達成熟階段。

第二節 風洞試驗

在風洞實驗前先以烘乾法測得砂土含水率為 0.9%，在含水率 1.2% 以下時，固定的風速條件，含水率對飛砂量無顯著影響 (林信輝等，1979)，因此試驗中不探討砂土含水率所造成影響。

一、植株覆蓋度與後緣風速之關係

在風速 6.3 m/s 的條件下可發現，三草種植物後緣風速皆隨其植株覆蓋度增加，有下降之趨勢(圖 4-11)。在植株覆蓋度達 20% 時至少可以減少 27.42% 的風速，若覆蓋度達 60% 時臺灣蘆竹更可降低高達 90.3% 的風速。在高植株覆蓋度(50%~60%)時，因臺灣蘆竹有較多的枝條密度可以抵擋氣流，所以比相同覆蓋度的甜根子草、蘆葦可以減緩更多的風速，另外在風速 10.8 m/s 的情境中亦可得到類似之結果 (圖 4-12)，三草種抗風蝕能力差異不大，臺灣蘆竹在高覆蓋度時表現最佳。

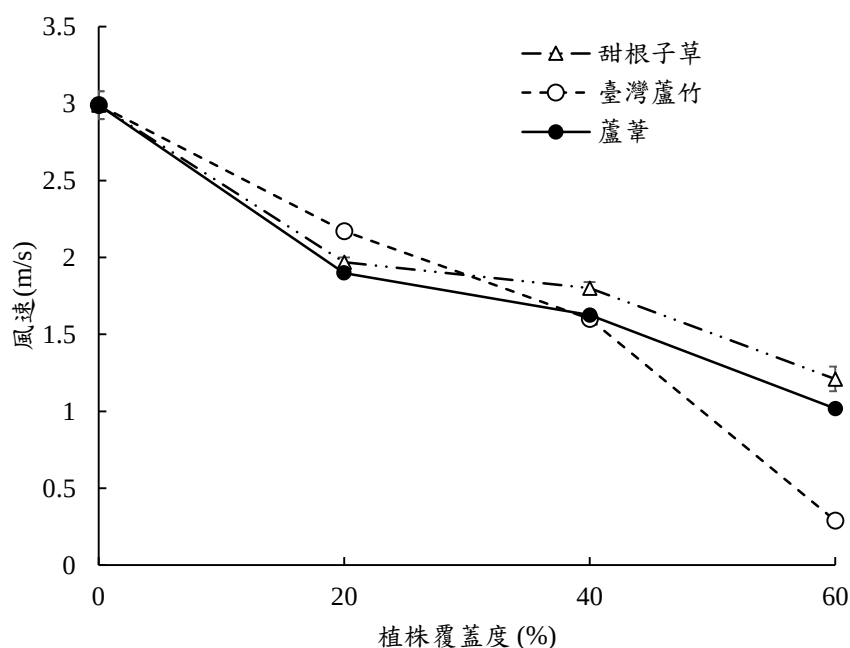


圖 4-11 風速 6.3m/s 下不同植株覆蓋度與後緣風速變化之關係

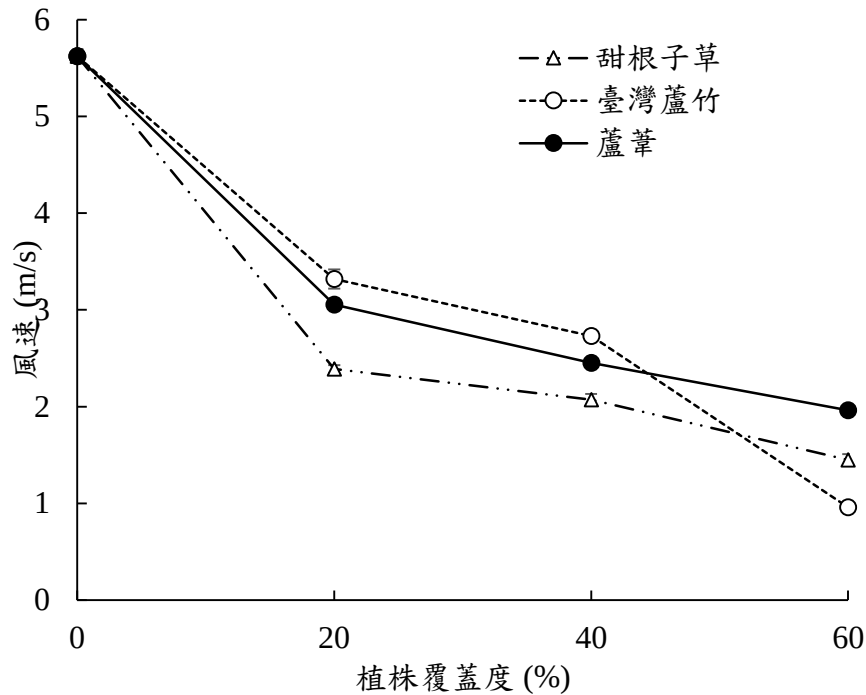


圖 4-12 風速 10.8m/s 下不同植株覆蓋度與後緣風速變化之關係

二、植株覆蓋度與風蝕率之關係

將砂土經粒徑 0.83 mm 的篩網簡單過篩並確認表層 10 cm 砂土含水量在 1.12% 後，即可測試草種分別在風速 6.3 m/s 及 10 m/s 以及在不同植株覆蓋度(0%、20%、40%、60)之飛砂量，飛砂量可經轉換得到風蝕率，進而比較不同草種之抗風時能力之差異。在不同風速下，無植株覆蓋的裸土風蝕率分別為： $17.73 \text{ g/m}^2\text{-sec}$ 和 $38.79 \text{ g/m}^2\text{-sec}$ ，可發現隨風速提高，風蝕的狀況有上升的情況。

在植株覆蓋度與風蝕率關係方面，由圖 4-13、圖 4-14 可發現不論是何種風速條件，風蝕率皆在植株覆蓋率 20% 有大幅度下降，並在覆蓋度達 60% 後下降則較為平緩。此外，三種植物不同的植株覆蓋度與風蝕率之間的關係呈現負指數相關(圖 4-13 和圖 4-14)。

將三草種間的抗風蝕能力相比較可發現在風速 6.3 m/s 植株覆蓋度 20%時，臺灣蘆竹有最好的抗風蝕能力，可減少 74.67%飛砂量，且臺灣蘆竹和甜根子草兩物種與蘆葦相比皆可提供較高的抗風蝕能力，且在統計上具有顯著差異。

當風速 10.8 m/s，植株覆蓋度 20%，甜根子草明顯比其他兩草種提供更高的抗風蝕效果，推測是該草種堅韌且粗大的莖桿可有效降低風速所導致的，當覆蓋度達 40%時臺灣蘆竹可提供最佳的抗風蝕效果，而蘆葦則是在任何覆蓋度都明顯比其他兩者有更高的風蝕量，此結果在風速 6.3 m/s 的實驗中也可得到。

綜合以上結果可得出在風速高且植株覆蓋度低時，甜根子可以提供較為優良的抗風蝕能力，但當風速低或植株覆蓋度較高時，臺灣蘆竹則具有較高的抗風蝕能力。

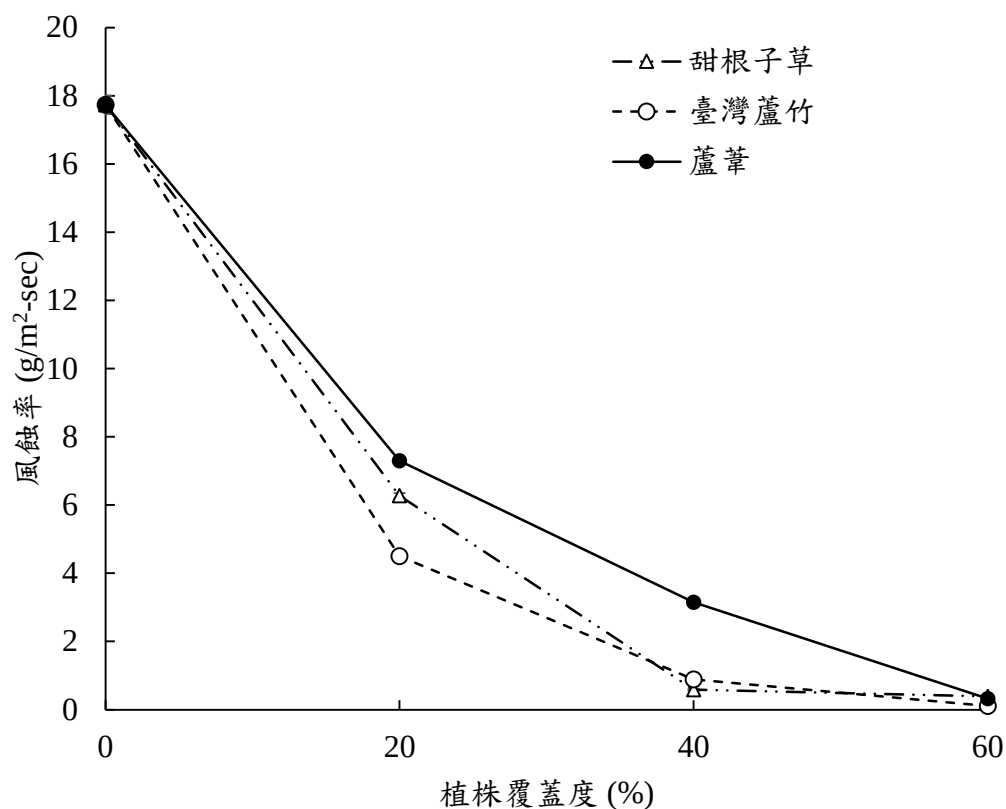


圖 4-13 風速 6.3m/s 下不同植株覆盖度與風蝕率之關係

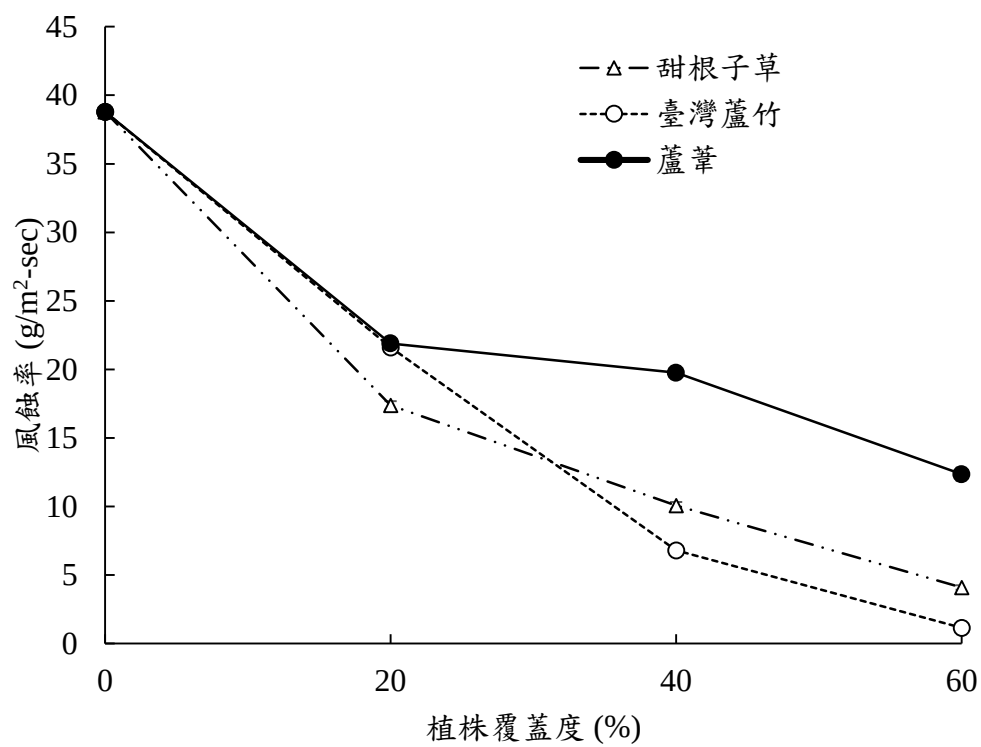


圖 4-14 風速 10.8m/s 下不同植株覆盖度與風蝕率之關係

表 4-4 三草種在風速 6.3 m/s 時不同覆蓋度間風蝕率之差異

草種	風速 6.3m/s 不同覆蓋度之平均風蝕率 (g/m ² -sec)			
	0 %	20 %	40 %	60 %
臺灣蘆竹	17.87±0.26 ^{a1}	4.63±0.1 ^c	1.02±0.04 ^b	0.24±0.01 ^c
蘆葦	17.87±0.26 ^a	7.43±0.05 ^a	3.29±0.08 ^a	0.46±0.01 ^b
甜根子草	17.87±0.26 ^a	6.41±0.08 ^b	0.72±0.03 ^c	0.53±0.02 ^a

所有數據為 10 重複之平均值±標準差

¹: 同行數值後字母不同，具有顯著差異 (P<0.05)

表 4-5 三草種在風速 10.8 m/s 時不同覆蓋度間風蝕率之差異

草種	風速 10.8 m/s 不同覆蓋度之平均風蝕率 (g/m ² -sec)			
	0 %	20 %	40 %	60 %
臺灣蘆竹	38.93±0.23 ^{a1}	21.73±0.35 ^a	6.95±0.09 ^c	1.3±0.03 ^c
蘆葦	38.93±0.23 ^a	22.22±0.25 ^a	19.89±0.3 ^a	12.49±0.47 ^a
甜根子草	38.93±0.23 ^a	17.51±0.3 ^b	10.21±0.25 ^b	4.23±0.16 ^b

所有數據為 10 重複之平均值±標準差

¹: 同行數值後字母不同，具有顯著差異 (P<0.05)

第三節根系型態與分布

將生長 6 個月的臺灣蘆竹、甜根子和蘆葦，利用直接開挖法將根系取出並用清水清洗附著在根系上的砂土，以避免影響後續之觀察，拍照記錄其根系輔以 WinRHIZO 軟體分析其根系型態，從臺灣蘆竹、甜根子和蘆葦三物種挑選出特徵較易辨別之個體作為分析對象，再利用 Pohl 等在 2011 年提出的根系判釋準則，發現臺灣蘆竹和甜根子為纖維型(fibrous)，根球中具有許多細而傾斜或垂直下降的根，蘆葦為側根型(lateral)，從主根上長出長放射狀散開的根(圖 4-15)。三草種在根系型態特徵分析結果中(表 4-6)，顯示在大部分的植物根系特徵性狀中甜根子優於臺灣蘆竹及蘆葦，且此差異在統計上具有顯著性。

根面積比的紀錄觀察中發現土層深度在 20-60cm 時，甜根子和蘆葦的根面積比幾乎較臺灣蘆竹來的高(圖 4-16)，且在統計上此差異具

有顯著(表 4-7)，在土層深度 0-70 cm 間三草種的根數量也有差異，甜根子的根數量明顯高於臺灣蘆竹與蘆葦(圖 4-17)，此差異在統計上具有顯著性(表 4-8)，綜合上述兩結果，顯示甜根子根系確實較其他兩種草種茂密，另外雖然蘆葦和臺灣蘆竹相同土層深度根數量差異不大，但根面積比卻有差異，推測此結果可能是因蘆葦有明顯主根導致，此推論確實也在型態判釋中得到應證。



圖 4-15 三草種之根系分布之情形

表 4-6 臺灣蘆竹、甜根子草及蘆葦形態特徵及功能性狀比較

	臺灣蘆竹	甜根子草	蘆葦	p
樹高 H(cm)	83.75±4.81 ^c	375.83±16.91 ^a	177.92±13.14 ^b	0.000***
基徑 S _{bd} (mm)	6.23±0.26 ^b	11.91±0.32 ^a	6.84±0.55 ^b	0.000***
主根長 L _{tr} (cm)	93.33±8.07 ^b	125.17±4.63 ^a	113.88±7.39 ^a	0.008**
根體積 R _v (cm ³)	343.75±46.82 ^b	1085.42±83.52 ^a	400.83±72.38 ^b	0.000***
地上部生物量 S _b (kg)	0.07±0.01 ^b	0.43±0.04 ^a	0.06±0.01 ^b	0.000***
根生物量 R _b (kg)	0.08±0.016 ^b	0.22±0.02 ^a	0.04±0.01 ^b	0.000***
總根長 R _L (cm)	3190.97±453.93 ^a	3931.61±365.19 ^a	2233.74±283.61 ^b	0.011*
根表面積 R _{SA} (cm ²)	2973.47±466.77 ^b	5276.63±442.11 ^a	1995.13±241.06 ^b	0.000***
根尖數 Tips	1421.42±240.01 ^a	1813.75±156.68 ^a	1226.33±212.61 ^a	0.137
根質量密度 RD(kg/m ³)	1.53±0.29 ^b	4.02±0.43 ^a	0.67±0.12 ^b	0.000***
根長密度 RLD(km/m ³)	0.59±0.08 ^a	0.73±0.07 ^a	0.41±0.05 ^b	0.011*
根組織密度 RTD(g/cm ³)	0.23±0.02 ^a	0.2±0.01 ^a	0.09±0.01 ^b	0.000***
比根長 SRL(m/g)	0.54±0.12 ^a	0.21±0.03 ^b	0.85±0.16 ^a	0.002**
比根面積 SRA(m ² /g)	0.0047±0.001 ^a	0.0027±0.00 ^b	0.0049±0.001 ^a	0.002**

¹：同列數值後字母不同，具有顯著差異 (P<0.05)

表 4-7 三草種之各土層深度與根面積比之關係

根面積比 (%)	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦	ANOVA(F)
0cm	0.00793±0.0062 ^a	0.00143±0.00045 ^a	0.00154±0.00021 ^a	1.077
10cm	0.01268±0.00854 ^{abc}	0.00033±0.00011 ^c	0.00168±0.00038 ^b	1.883
20cm	0.00134±0.00015 ^a	0.00014±0.00004 ^b	0.00204±0.00049 ^a	10.507***
30cm	0.00092±0.00011 ^a	0.00007±0.00002 ^b	0.00193±0.00048 ^a	10.588***
40cm	0.00079±0.00011 ^a	0.00005±0.00002 ^b	0.00153±0.00029 ^a	16.613***
50cm	0.00070±0.00016 ^a	0.00004±0.00002 ^b	0.00130±0.00030 ^a	10.706***
60cm	0.00034±0.00010 ^b	0.00002±0.00001 ^c	0.00050±0.00020 ^{abc}	3.583*
70cm	0.00015±0.00006 ^a	0.00001±0.00001 ^b	0.00010±0.00005 ^{ab}	2.517
80cm	0.00008±0.00003 ^a	0.00001±0.00000 ^b	0.00009±0.00005 ^{ab}	2.042
90cm	0.00003±0.00001 ^a	0.00000±0.00000 ^b	0.00002±0.00001 ^{ab}	3.040
100cm	0.00001±0.00001 ^a	0.00000±0.00000 ^a	0.00001±0.00000 ^a	0.846
110cm	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	0.00001±0.00001 ^a	1.052
120cm	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	2.378
130cm	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	2.282
140cm	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	0.00000±0.00000 ^a	1.488

¹：同列數值後字母不同，具有顯著差異 (P<0.05)

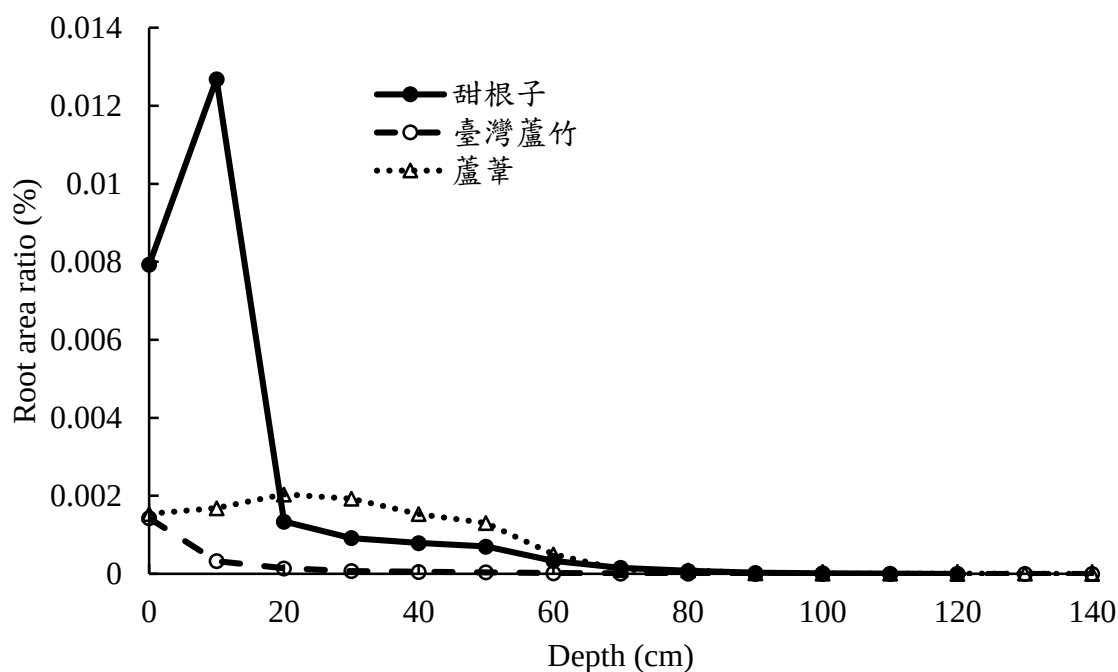


圖 4-16 三草種之各土層深度與根面積比之關係

表 4-8 三草種之各土層深度與根數量之關係

根數量	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦	ANOVA(F)
0cm	358.667±66.099 ^a	101.000±13.305 ^b	56.000±7.088 ^c	17.408***
10cm	435.250±62.219 ^a	61.500±10.172 ^b	41.167±8.328 ^b	36.523***
20cm	366.583±43.174 ^a	46.833±4.701 ^b	51.500±11.204 ^b	50.092***
30cm	238.167±32.056 ^a	40.583±5.765 ^b	45.417±8.264 ^b	33.751***
40cm	250.833±42.972 ^a	31.750±4.760 ^b	48.667±9.121 ^b	22.832***
50cm	188.083±38.467 ^a	34.333±18.056 ^b	37.583±6.966 ^b	12.485***
60cm	112.250±21.400 ^a	21.500±10.863 ^b	35.000±6.615 ^b	11.607***
70cm	57.417±15.496 ^a	14.583±7.533 ^b	16.417±3.787 ^b	5.654**
80cm	29.250±8.533 ^a	9.833±6.218 ^b	9.583±2.971 ^b	3.175
90cm	15.583±5.711 ^a	6.583±4.052 ^a	6.833±1.817 ^a	1.506
100cm	6.167±3.209 ^a	1.667±1.018 ^a	3.500±1.118 ^a	1.221
110cm	2.917±2.002 ^a	1.583±1.583 ^a	2.833±0.928 ^a	0.227
120cm	1.417±1.417 ^a	0.250±0.250 ^a	1.333±0.482 ^a	0.552
130cm	0.000±0.000 ^a	0.583±0.583 ^a	0.833±0.458 ^a	0.998
140cm	0.000±0.000 ^b	0.000±0.000 ^b	0.250±0.131 ^a	3.667*

¹：同列數值後字母不同，具有顯著差異 (P<0.05)

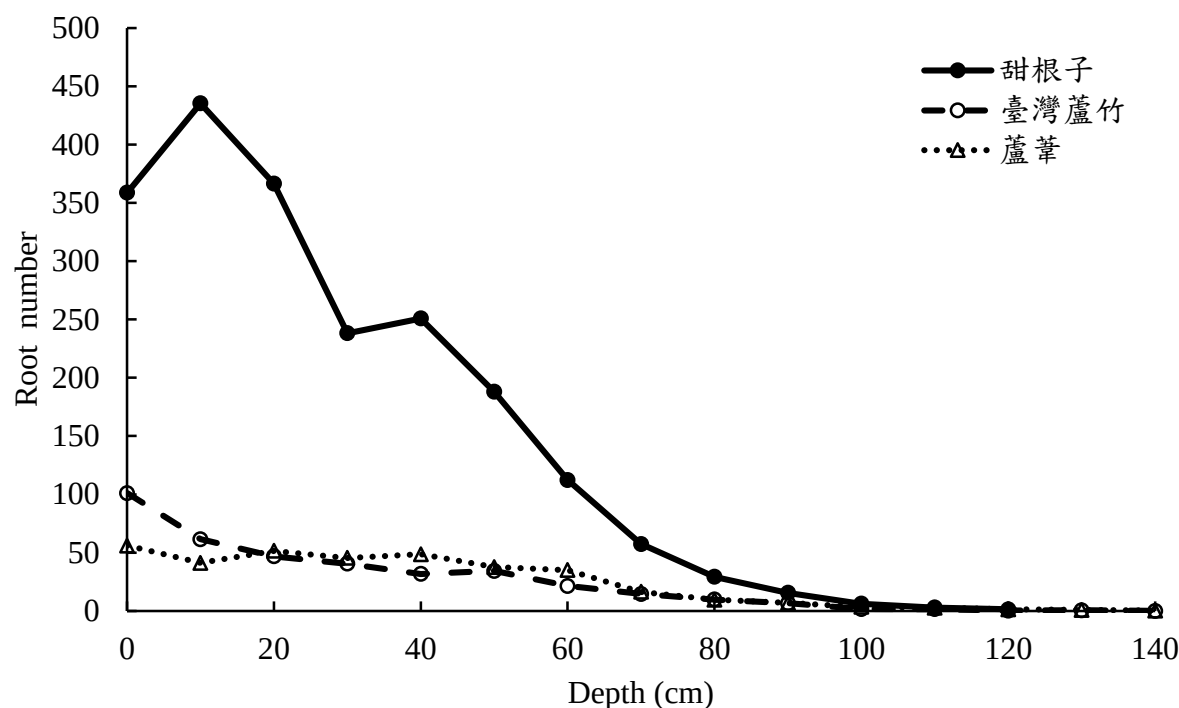


圖 4-17 三草種之各土層深度與根數量之關係

第四節根系力學

一、含根砂土抗剪強度及抗剪強度增量

進行剪力試驗後，可求得臺灣蘆竹、甜根子與蘆葦和裸土之最大剪力值，蘆葦的最大抗剪力最大，平均有 1.26 ± 0.1 kN，蘆葦次之，平均有 0.81 ± 0.13 kN，再者為臺灣蘆竹，平均為 0.42 ± 0.05 kN，裸土最小，平均為 0.28 ± 0.024 kN，經由 ANOVA 分析得知甜根子和蘆葦的最大抗剪力並無顯著差異，但這兩物種與臺灣蘆竹之最大抗剪力皆有顯著差異，且臺灣蘆竹的最大抗剪力有裸土相比並無顯著差異(表 4-9)。透過 Excel 將剪力試驗之結果繪製成抗剪力曲線後可明顯看出甜根子和蘆葦的最大剪力值較臺灣蘆竹高，且臺灣蘆竹之值與裸土接近(圖 4-18)。

根系可以增強土壤的抗剪強度，在施加不同正向力與抗剪強度之關係中可發現臺灣蘆竹和裸土之回歸式 F 值顯著性在統計上有相關性，表示這兩條回歸式是具有意義且合理的方程式，且在 R^2 皆在 0.9 以上顯示在臺灣蘆竹與裸土兩種處理其正向力大小和抗剪強度是有相關的，而甜根子和蘆葦的回歸式 F 值未達統計上相關性推測原因是其物種內不同樣本根系生長差異過大導致施加不同正向力並非改變其抗剪強度之主因(圖 4-19)。

將最大抗剪力經計算可得抗剪強度增量(圖 4-20)，經 ANOVA 分析三者皆具有顯著差異，以甜根子的抗剪強度增量為最大，為 13.85 ± 1.39 kPa，蘆葦 7.47 ± 1.73 kPa 為次之，最小為臺灣蘆竹 1.68 ± 0.42 kPa，透過 Mohr-Coulomb 破壞準則中的 $\tau = c + \Delta\tau_r + \sigma \tan\phi$ ，輔以本研究所推導的方程式可得四種不同處理土體之凝聚力，其數值皆大於未含根土壤，尤其以甜根子和蘆葦為明顯，四者凝聚力分別為：臺

灣蘆竹2.5357 kPa、甜根子15.164 kPa、蘆葦6.5248 kPa 和裸土 2.2874 kPa，其結果顯示透過栽植植株的方式可提高土壤的抗剪強度，增強其邊坡穩定，以甜根子帶來的增量為最佳。

表 4-9 三草種與裸土之最大抗剪力、抗剪強度之增量與土層深度 30 cm 根系分布之狀況

	臺灣蘆竹	甜根子	蘆葦	裸土	F
最大抗剪力 (kN)	0.42±0.05 ^b	1.26±0.1 ^a	0.81±0.13 ^a	0.28±0.024 ^b	24.871***
抗剪強度增量 (kPa)	1.68±0.42 ^c	13.85±1.39 ^a	7.47±1.73 ^b	-	21.922***
30 cm 截面之 根面積比(%)	0.00007±0.00002 ^b	0.00092±0.0011 ^a	0.00192±0.00048 ^a	-	10.593***
30 cm 截面之 根數量	40.583±5.76 ^b	238.17±32.06 ^a	45.417±8.2641 ^b	-	40.878***
c(kPa)	2.5357	15.164	6.5248	2.2874	-
$\psi(^{\circ})$	29.8342	21.7223	37.2021	13.8852	-

¹：同列數值後字母不同，具有顯著差異 (P<0.05)

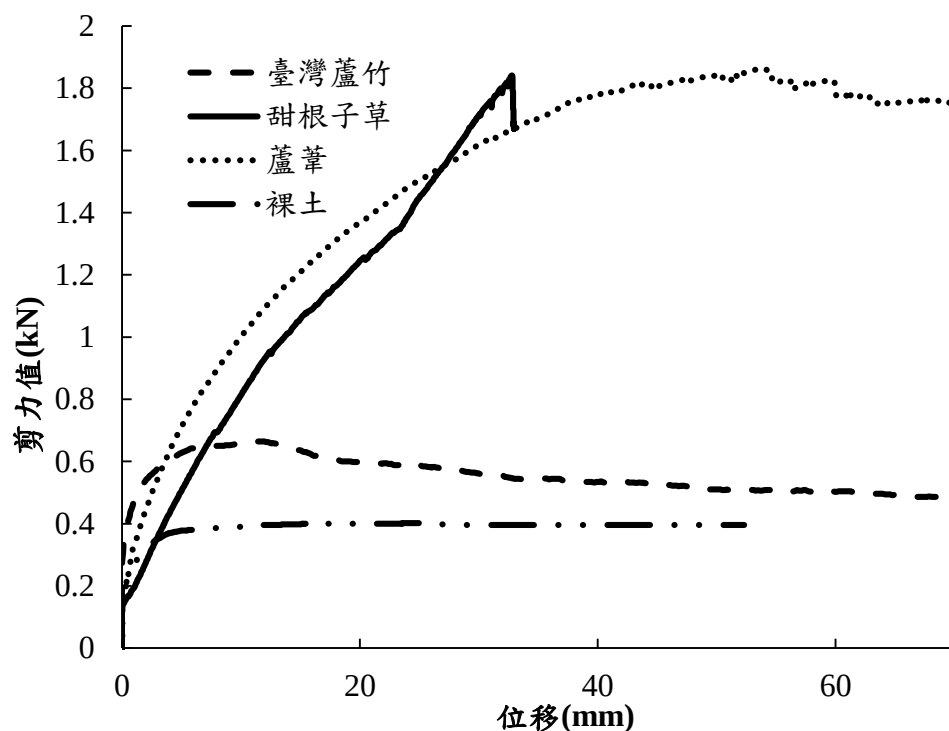


圖 4-18 三草種最大剪力值與位移之關係

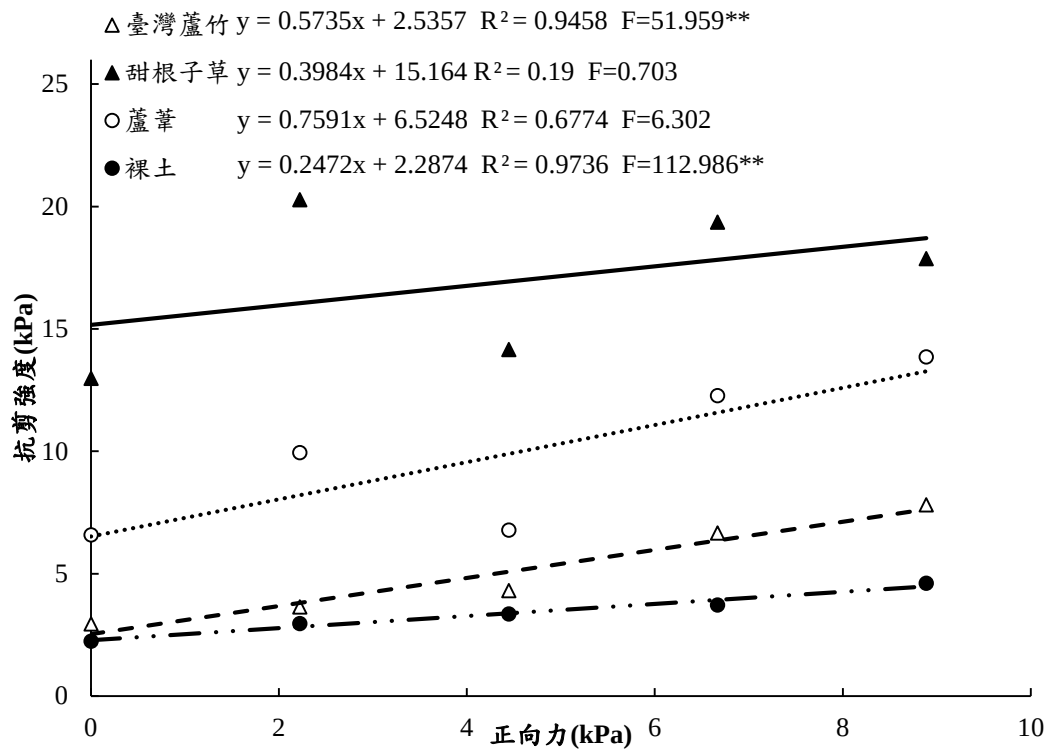


圖 4-19 三草種與裸土施加不同正向力與抗剪強度之關係

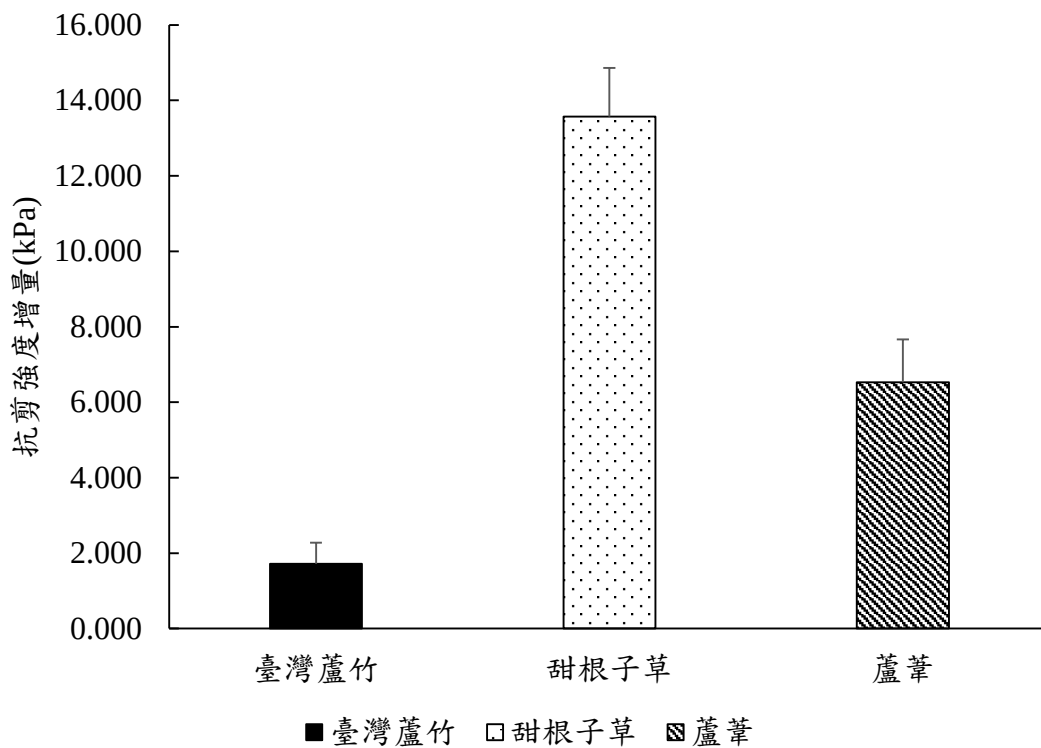


圖 4-20 三草種抗剪強度增量之差異

二、拉力與植株生物性狀之關係

透過 SPSS 的 ANOVA 分析後顯示臺灣蘆竹、甜根子和蘆葦三者在統計上皆有顯著差異，甜根子具最大的抗拉拔力 1.4425 ± 0.3511 kN，蘆葦的最大抗拉拔力次之為 0.3592 ± 0.0679 kN，臺灣蘆竹抗拉拔力 0.2783 ± 0.0707 kN 最小(表 4-10 及圖 4-21)。

植物的抗拉拔能力可顯示根系與土壤的固結能力，且較大的抗拉拔力可避免在連日暴雨的條件下，植物被暴漲溪流給連根拔起，因此藉由皮爾森相關性矩陣了解最大抗拉拔力與植株生物性狀間是否有相關。分析結果顯示臺灣蘆竹之最大抗拉拔力未與任何生物性狀有相關(表 4-11)，甜根子的最大抗拉拔力與總根長和根長密度呈現正相關(表 4-12)，具有顯著相關(圖 4-22 及圖 4-23)，蘆葦最大抗拉拔力與根體積和地上部生物量呈現正相關(表 4-13)，皆有顯著相關(圖 4-24 與圖 4-25)，圖 4-22-圖 4-25 為各草種根系性狀具顯著關係因子與拉拔抗力之回歸，可看出均呈正相關性。

表 4-10 三草種之最大抗拉拔力

	臺灣蘆竹	甜根子	蘆葦
拉力 P_r (kN)	0.2783 ± 0.0707^b	1.4425 ± 0.3511^a	0.3592 ± 0.0679^b

¹：同列數值後字母不同，具有顯著差異 ($P < 0.05$)

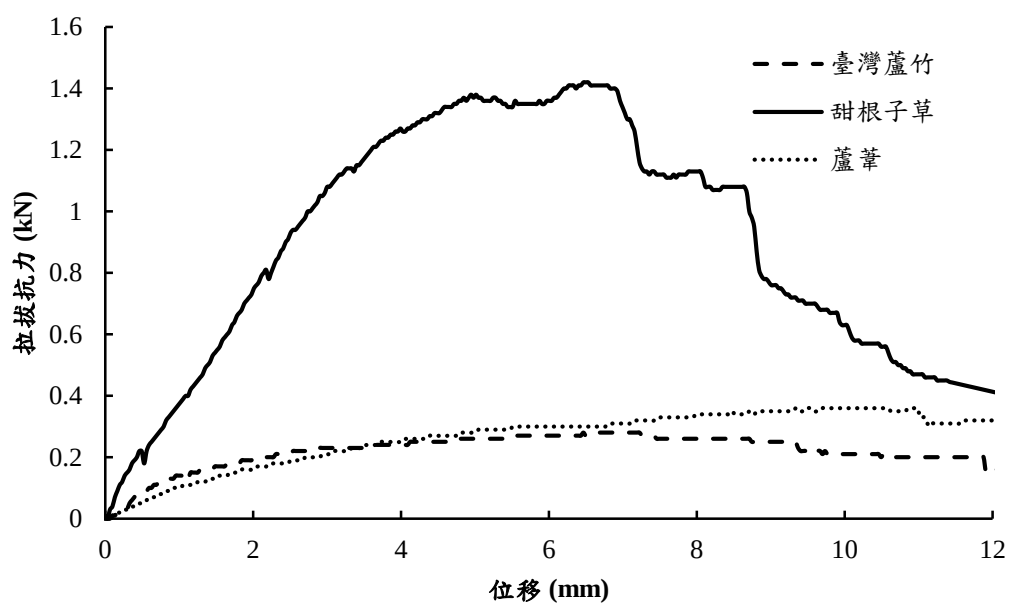


圖 4-21 三草種最大拉拔抗力值與位移之關係

表 4-11 臺灣蘆竹植物性狀與拉拔抗力之相關性矩陣

	P _r	H	S _{bd}	L _{tr}	R _v	S _b	R _b	R _L	R _{SA}	Tips	RD	RLD	RTD	SRL	SRA
P _r	1														
H	0.539	1													
S _{bd}	0.165	0.466	1												
L _{tr}	0.53	0.148	0.03	1											
R _v	0.407	0.49	0.278	0.404	1										
S _b	0.542	0.727**	0.039	0.266	0.824**	1									
R _b	0.518	0.605*	0.161	0.269	0.925**	0.917**	1								
R _L	0.574	0.36	0.03	0.505	0.586*	0.625*	0.754**	1							
R _{SA}	0.52	0.369	0.056	0.174	0.749**	0.738**	0.879**	0.82**	1						
Tips	0.523	0.473	-0.024	0.6*	0.498	0.604*	0.598*	0.81**	0.504	1					
RD	0.518	0.605*	0.161	0.369	0.925**	0.917**	1**	0.754**	0.879**	0.598*	1				
RLD	0.574	0.361	0.031	0.505	0.586*	0.625*	0.754**	1**	0.82**	0.81**	0.754**	1			
RTD	0.472	0.677*	0.002	0.151	0.397	0.696*	0.675*	0.499	0.553	0.363	0.676*	0.5	1		
SRL	-0.274	-0.408	0.062	-0.375	-0.631*	-0.659*	-0.617*	-0.112	-0.289	-0.163	-0.617*	-0.113	-0.585*	1	
SRA	-0.292	-0.456	0.031	-0.547	-0.573	-0.604*	-0.557	-0.13	-0.159	-0.266	-0.557	-0.13	-0.56	0.948**	1

P_r:拉力；H:樹高；S_{bd}:基徑；L_{tr}:主根長；R_v:根體積；S_b:地上部生物量；R_b:根乾重；R_L:總根長；R_{SA}:根表面積；Tips:根尖數；RD:根質量密度；RLD:根長密度；RTD:根組織密度；SRL:比根長；SRA:比根面積。

¹Pearson 相關分析，不同變數間所對應數值為相關係數(r)，有星號數值代表兩變數間相關性具顯著水準，不同星號數代表不同程度顯著性(*p<0.05; **p<0.01)。

表 4-12 甜根子草植物性狀與拉拔抗力之相關性矩陣

	P _r	H	S _{bd}	L _{tr}	R _v	S _b	R _b	R _L	R _{SA}	Tips	RD	RLD	RTD	SRL	SRA
P _r	1														
H	0.087	1													
S _{bd}	0.105	-0.241	1												
L _{tr}	-0.067	-0.673*	0.081	1											
R _v	0.306	-0.203	-0.166	0.77**	1										
S _b	0.444	-0.019	0.027	0.345	0.618*	1									
R _b	0.185	0.285	-0.11	0.419	0.692*	0.524	1								
R _L	0.694*	0.008	0.25	-0.074	0.049	0.135	0.028	1							
R _{SA}	0.402	-0.344	0.359	0.367	0.378	0.512	0.072	0.642*	1						
Tips	0.478	0.064	0.229	-0.135	-0.19	-0.244	-0.06	0.832**	0.273	1					
RD	0.185	0.285	-0.11	0.419	0.692*	0.524	1**	0.028	0.072	-0.06	1				
RLD	0.694*	0.009	0.25	-0.074	0.049	0.135	0.028	1**	0.642*	0.832**	0.028	1			
RTD	-0.094	0.581*	0.064	-0.127	0.014	0.072	0.715**	-0.012	-0.233	0.1	0.715**	-0.012	1		
SRL	0.279	-0.217	0.183	-0.366	-0.531	-0.368	-0.713**	0.627*	0.228	0.635*	-0.713**	0.627*	-0.498	1	
SRA	0.143	-0.463	0.25	-0.101	-0.314	-0.132	-0.744**	0.486	0.562	0.313	-0.744**	0.487	-0.731**	0.827**	1

P_r:拉力；H:樹高；S_{bd}:基徑；L_{tr}:主根長；R_v:根體積；S_b:地上部生物量；R_b:根乾重；R_L:總根長；R_{SA}:根表面積；Tips:根尖數；RD:根質量密度；RLD:根長密度；RTD:根組織密度；SRL:比根長；SRA:比根面積。

¹Pearson 相關分析，不同變數間所對應數值為相關係數(r)，有星號數值代表兩變數間相關性具顯著水準，不同星號數代表不同程度顯著性(*p<0.05; **p<0.01)。

表 4-13 蘆葦植物性狀與拉拔抗力之相關性矩陣

	P _r	H	S _{bd}	L _{tr}	R _v	S _b	R _b	R _L	R _{SA}	Tips	RD	RLD	RTD	SRL	SRA
P _r	1														
H	0.534	1													
S _{bd}	0.317	0.863**	1												
L _{tr}	0.537	-0.063	-0.256	1											
R _v	0.63*	0.41	0.096	0.462	1										
S _b	0.769**	0.695*	0.505	0.314	0.698*	1									
R _b	0.537	0.393	0.077	0.382	0.963**	0.643*	1								
R _L	0.33	-0.138	-0.245	0.491	0.298	-0.095	0.319	1							
R _{SA}	0.279	-0.012	-0.165	0.228	0.248	-0.078	0.304	0.849**	1						
Tips	0.278	-0.113	-0.275	0.461	0.484	0.05	0.483	0.881**	0.638*	1					
RD	0.537	0.393	0.078	0.382	0.963**	0.643*	1**	0.319	0.303	0.483	1				
RLD	0.33	-0.138	-0.244	0.491	0.298	-0.095	0.319	1**	0.849**	0.881**	0.319	1			
RTD	-0.247	0.052	0.093	-0.289	-0.2	-0.299	0.042	0.187	0.31	0.002	0.042	0.187	1		
SRL	-0.358	-0.427	-0.297	-0.102	-0.703*	-0.728**	-0.721**	0.109	-0.055	-0.033	-0.721**	0.108	0.165	1	
SRA	-0.431	-0.411	-0.263	-0.304	-0.838**	-0.768**	-0.844**	0.01	0.057	-0.215	-0.844**	0.009	0.19	0.909**	1

P_r:拉力; H:樹高 ; S_{bd}:基徑; L_{tr}:主根長; R_v:根體積; S_b:地上部生物量; R_b:根乾重; R_L:總根長; R_{SA}:根表面積; Tips:根尖數; RD:根質量密度; RLD:根長密度; RTD:根組織密度; SRL:比根長; SRA:比根面積。

¹Pearson 相關分析，不同變數間所對應數值為相關係數(r)，有星號數值代表兩變數間相關性具顯著水準，不同星號數代表不同程度顯著性(*p<0.05; **p<0.01)。

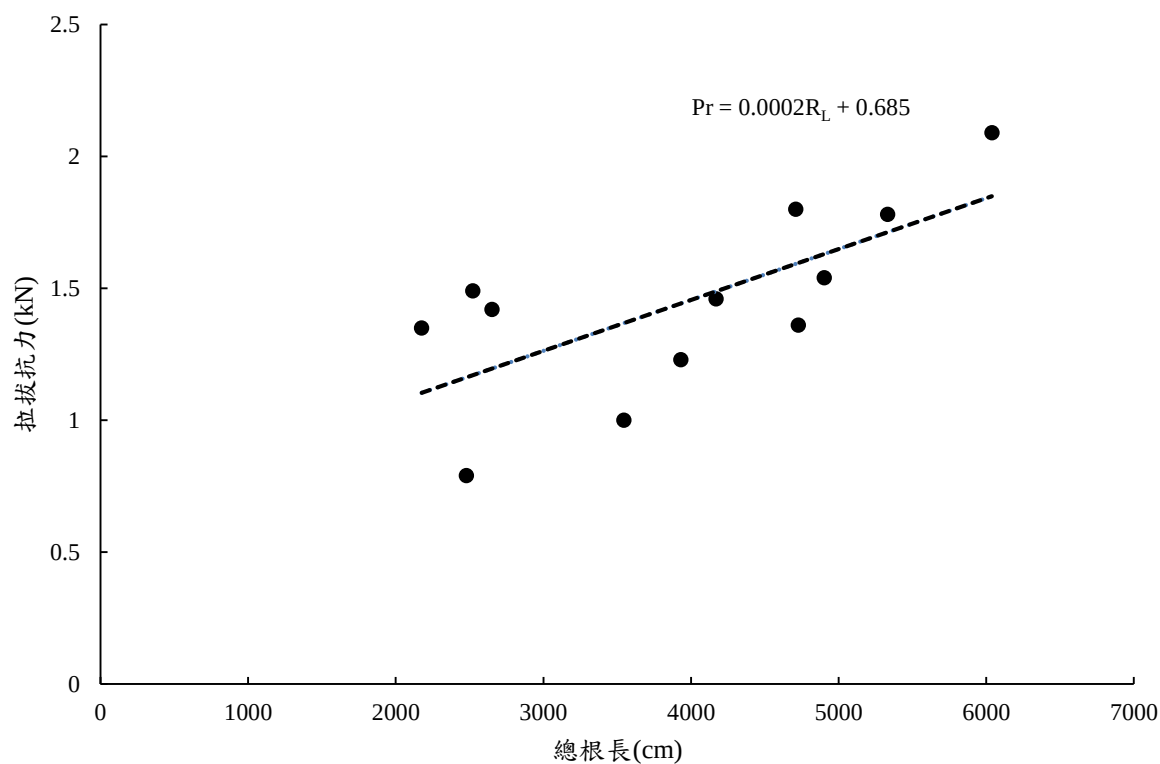


圖 4-22 甜根子總根長與拉拔抗力之迴歸關係

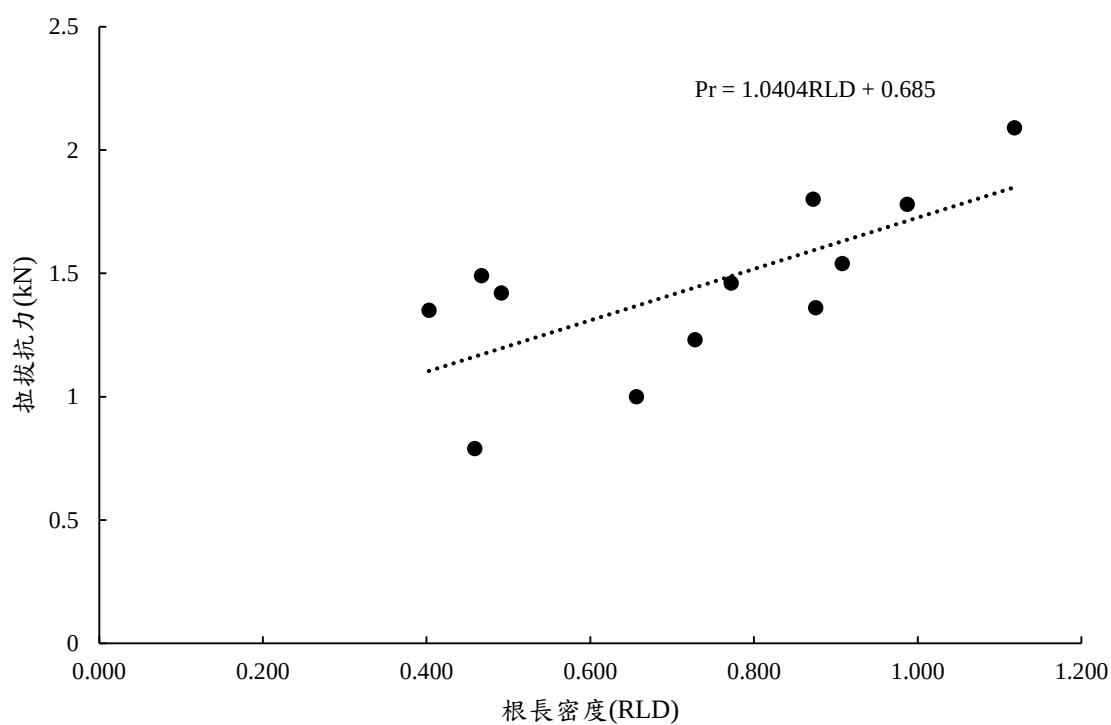


圖 4-23 甜根子根長密度與拉拔抗力之迴歸關係

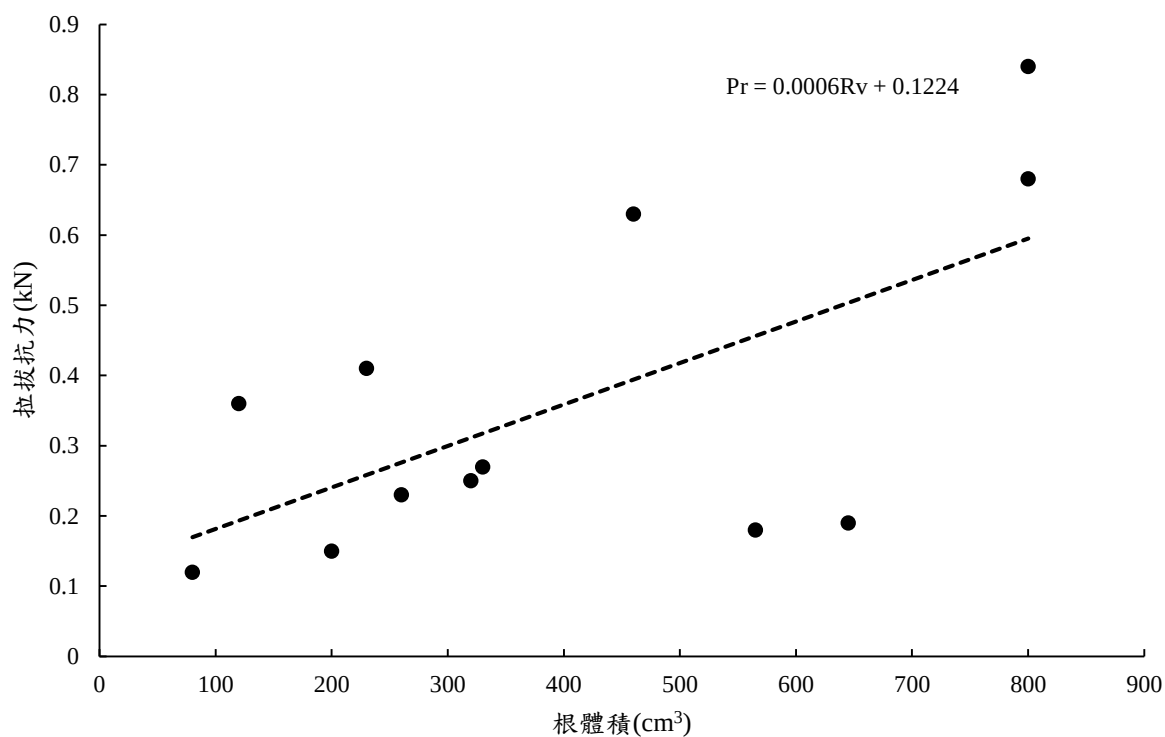


圖 4-24 蘆葦根體積與拉拔抗力之迴歸關係

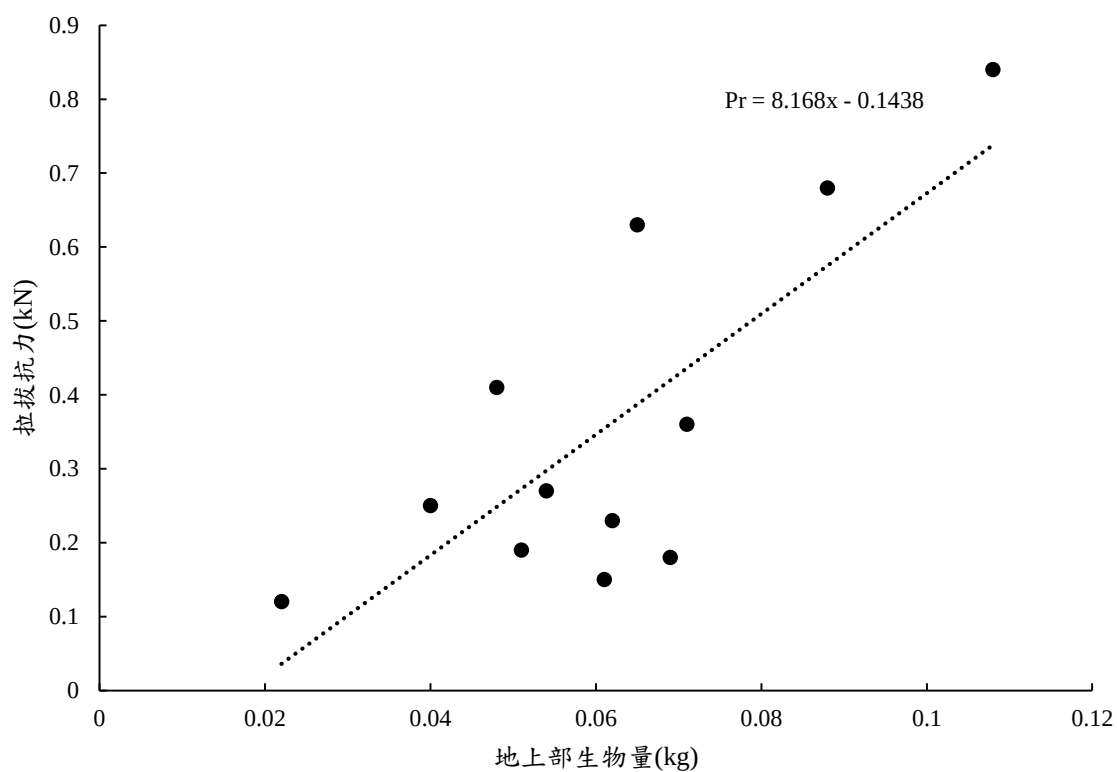


圖 4-25 蘆葦地上部生物量與拉拔抗力之迴歸關係

三、單根拉伸試驗

本單根拉伸試驗採用之根段含水率約落在 70% 左右，蘆葦的根徑最大，甜根子次之，臺灣蘆竹則為最小，且在 ANOVA 分析後皆具有顯著性，代表三草種根徑有顯著差異。在楊氏係數和抗拉強度方面，甜根子最佳，再者為臺灣蘆竹，蘆葦為最小，且三者統計上具有顯著差異，蘆葦在單根抗拉力則有最佳表現，甜根子次之，最小為臺灣蘆竹，該結果經分析亦具有顯著性差異(表 4-14)。

甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦之單根拉力和根段指數迴歸分析結果顯示單根抗拉力會隨根徑增加而上升(圖 4-26、圖 4-27 及圖 4-28)，經由 SPSS 分析後可知該三條回歸式之 F 值皆具有顯著性，也就是該式為合理且具意義之方程式， R^2 值約在 0.70-0.76 間，其具高度解釋能力，表示單根拉力和根徑間呈現正指數相關。

甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦之單根抗拉強度與根徑關係呈現負指數相關，抗拉強度隨根徑增加而下降(圖 4-29、圖 4-30 與圖 4-31)，經由 SPSS 分析後顯示該三條回歸式之 F 值皆具有顯著性，也就是為合理且具意義之方程式， R^2 值約在 0.50-0.57 間，其具中度解釋能力，表示單根拉力和根徑間呈現負指數相關。

甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦之楊氏係數與根徑關係亦為負指數相關，楊氏係數會隨根徑之增加呈現減少之趨勢(圖 4-32、圖 4-33 和圖 4-34)，經由 SPSS 分析後，結果為三條回歸式之 F 值皆具有顯著性，也就是為合理且具意義之方程式， R^2 值約在 0.44-0.61 間，其具中度解釋能力，表示楊氏係數與根徑間呈現負指數相關。

甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦之楊氏係數與抗拉強度亦為線性正相關，抗拉強度隨楊氏係數增加而增強(圖 4-35、圖 4-36 及圖 4-37)，

經由 SPSS 分析後，結果為三條回歸式之 F 值皆具有顯著性，也就是為合理且具意義之方程式， R^2 值約在 0.50 左右，為中度解釋能力，表示楊氏係數與根徑間呈現線性正相關，當楊氏係數越高時也就是彈性越高時，抗拉強度也會隨之提高。

表 4-14 三草種之單根力學試驗

	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦	F
根徑 D (mm)	0.924±0.018 ^b	0.813±0.020 ^c	2.080±0.105 ^a	126.010***
楊氏係數 E_r (MPa)	619.414±30.604 ^a	438.335±41.653 ^b	169.838±13.83 ^{5c}	64.487***
單根抗拉力(N)	17.087±0.389 ^b	11.698±0.381 ^c	32.329±2.897 ^a	36.149***
抗拉強度 T_s (MPa)	325.060±10.767 ^a	260.171±9.983 ^b	121.987±6.121 ^c	117.738***

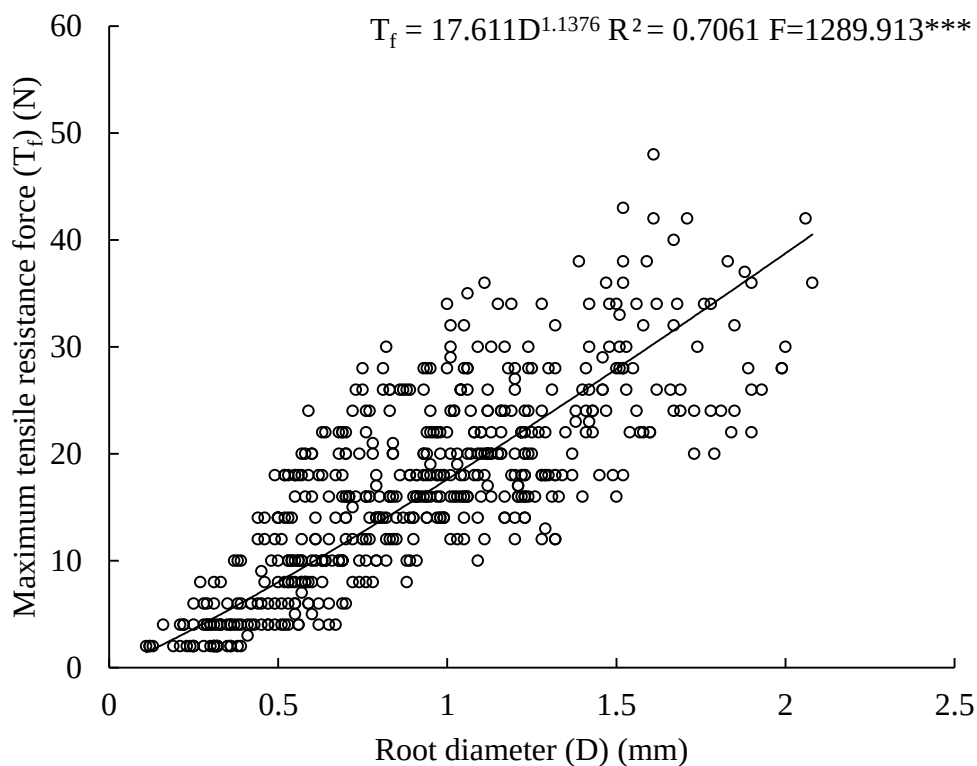


圖 4-26 甜根子根徑與植物單根抗拉力之關係及其迴歸曲線

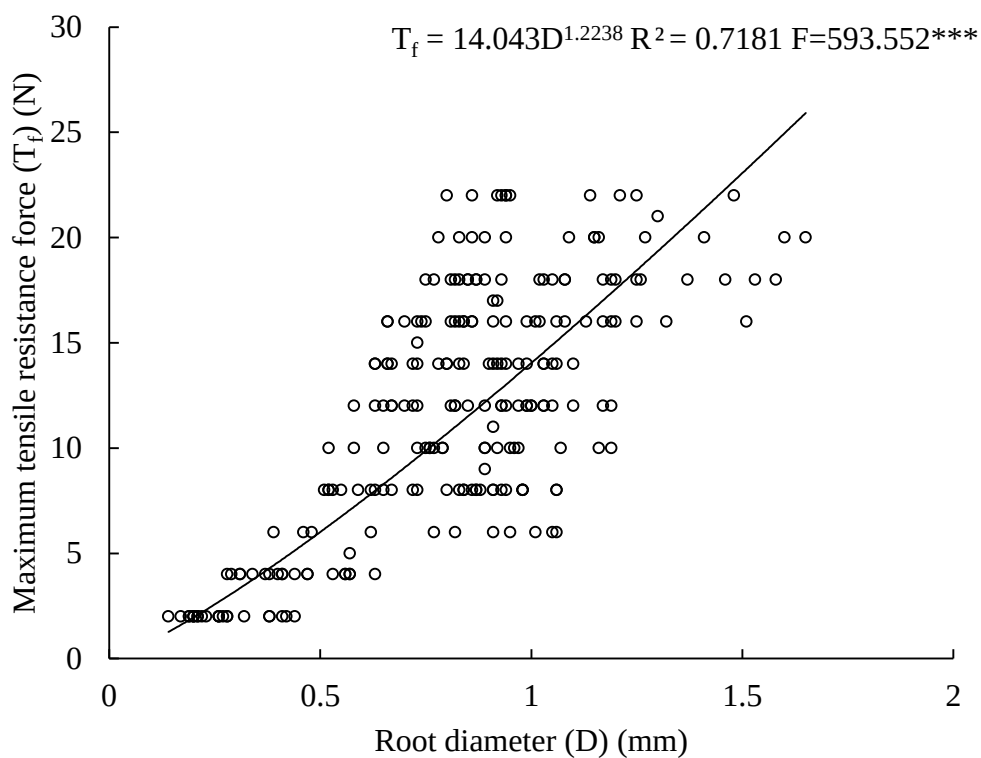


圖 4-27 臺灣蘆竹根徑與植物單根抗拉力之關係及其迴歸曲線

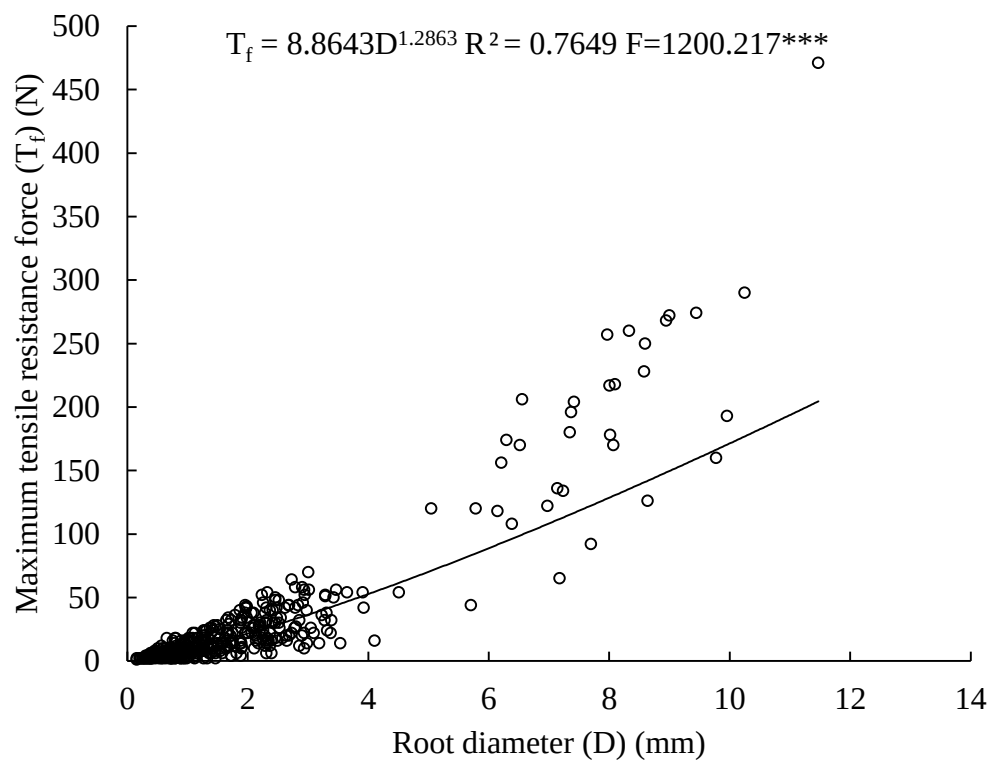


圖 4-28 蘆葦根徑與植物單根抗拉力之關係及其迴歸曲線

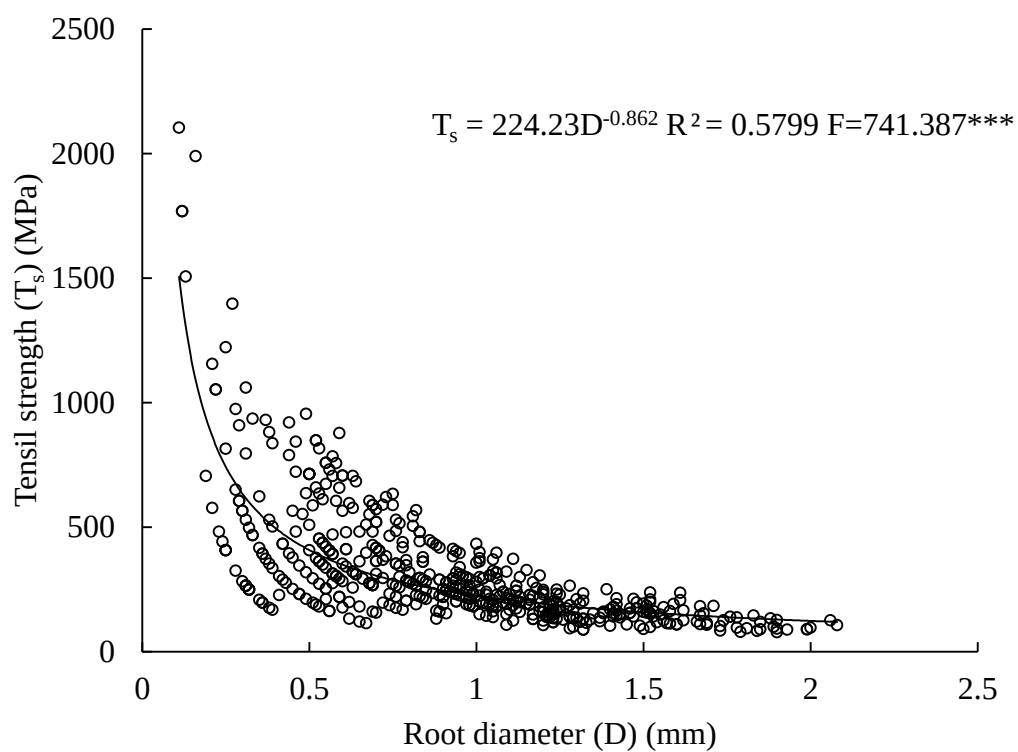


圖 4-29 甜根子根徑與單根抗拉強度之關係及其迴歸曲線

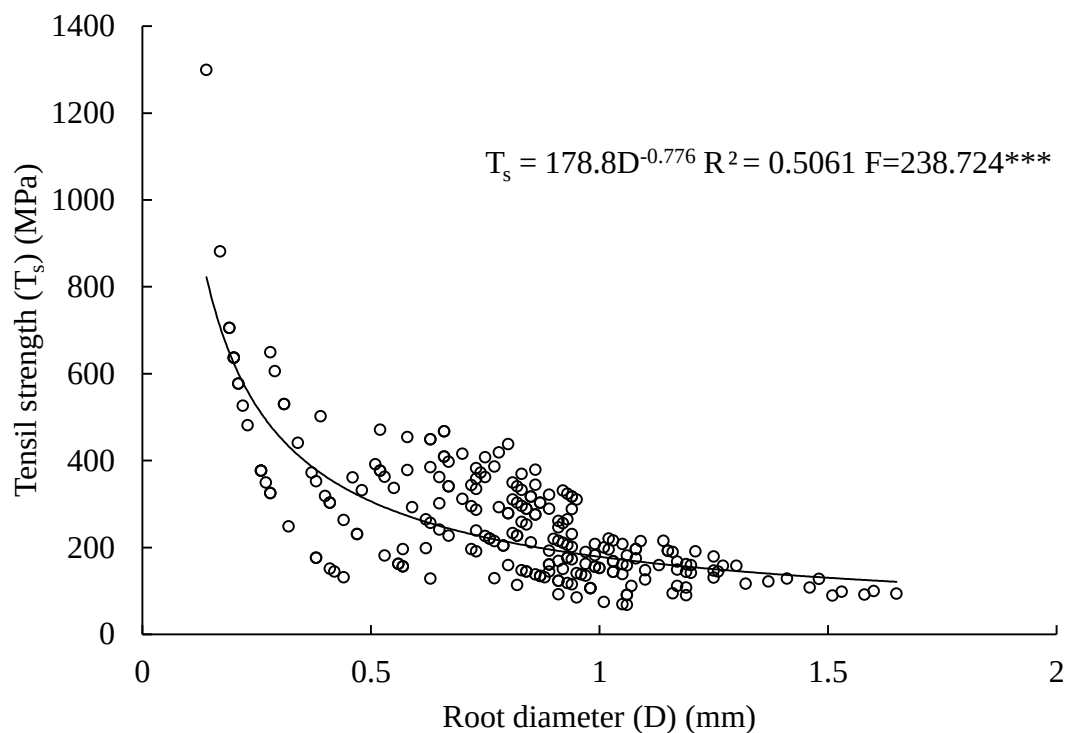


圖 4-30 臺灣蘆竹根徑與單根抗拉強度之關係及其迴歸曲線

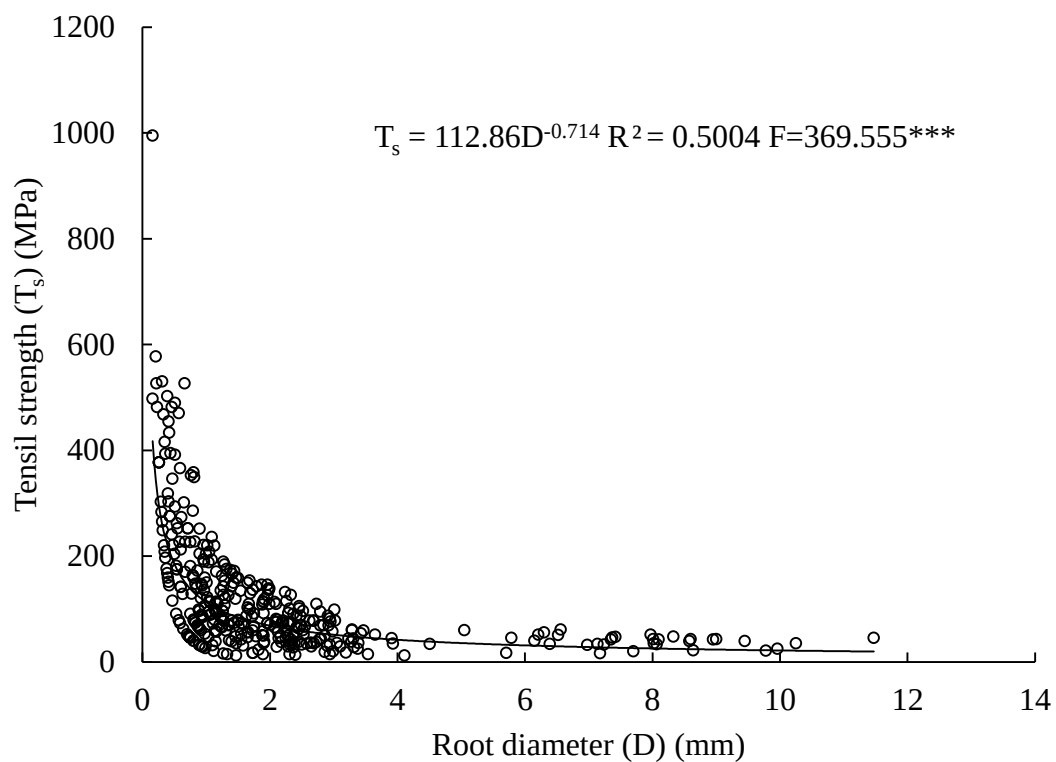


圖 4-31 蘆葦根徑與單根抗拉強度之關係及其迴歸曲線

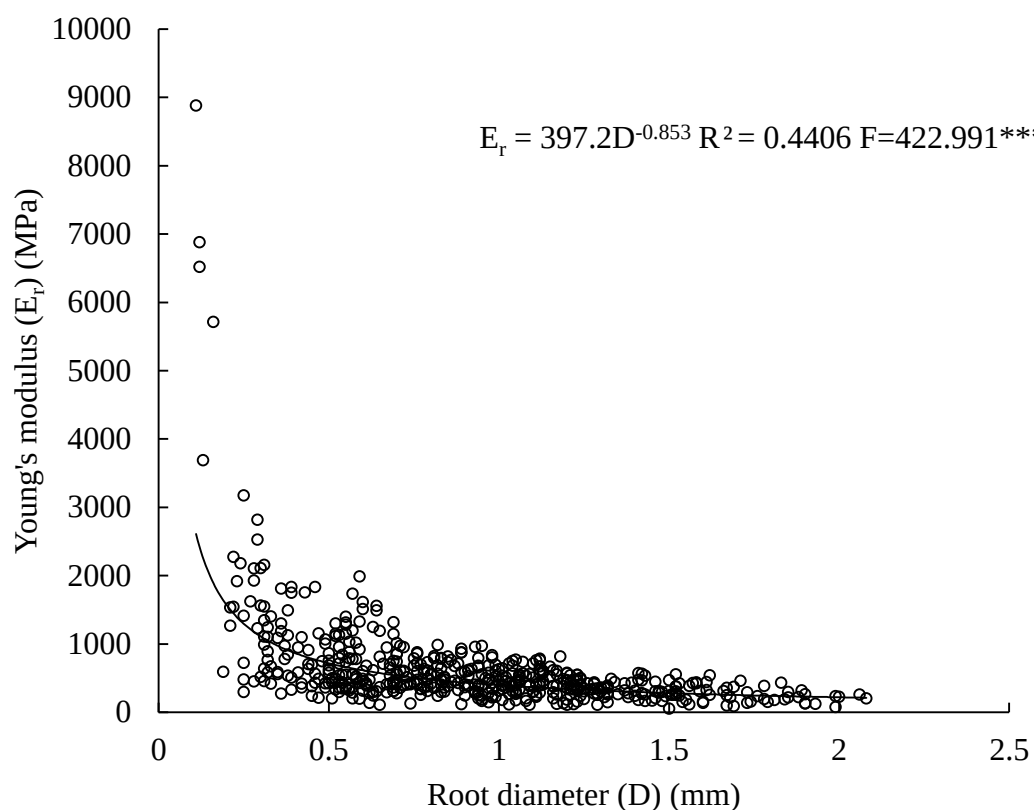


圖 4-32 甜根子根徑與單根楊氏模數之關係及其迴歸曲線

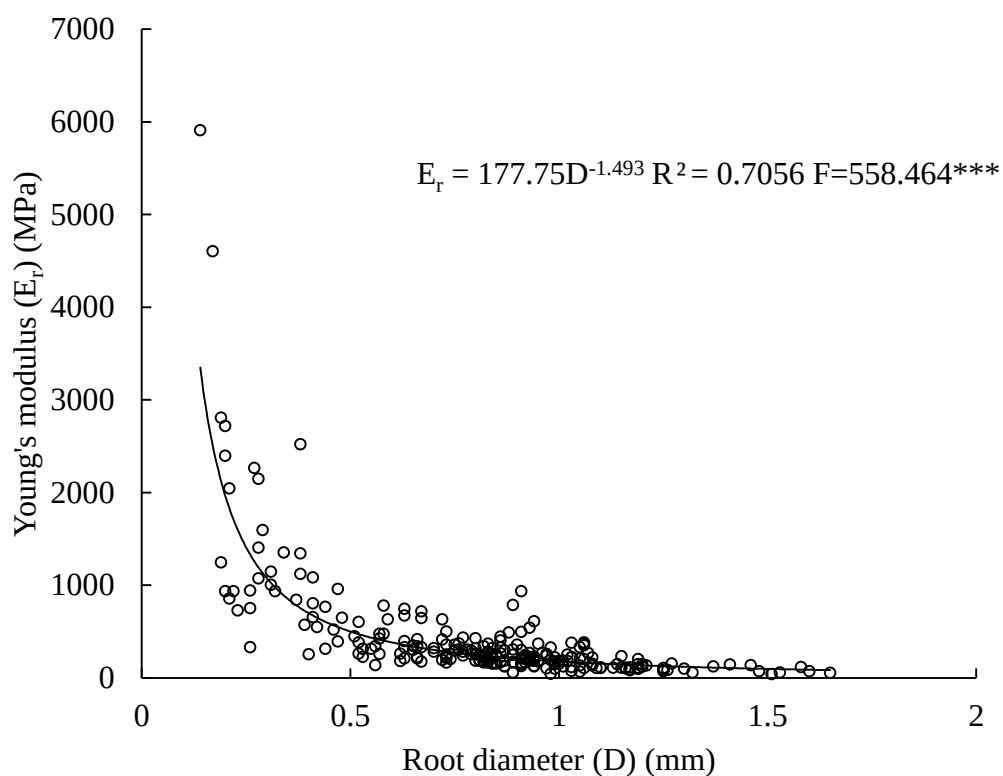


圖 4-33 臺灣蘆竹根徑與單根楊氏模數之關係及其迴歸曲線

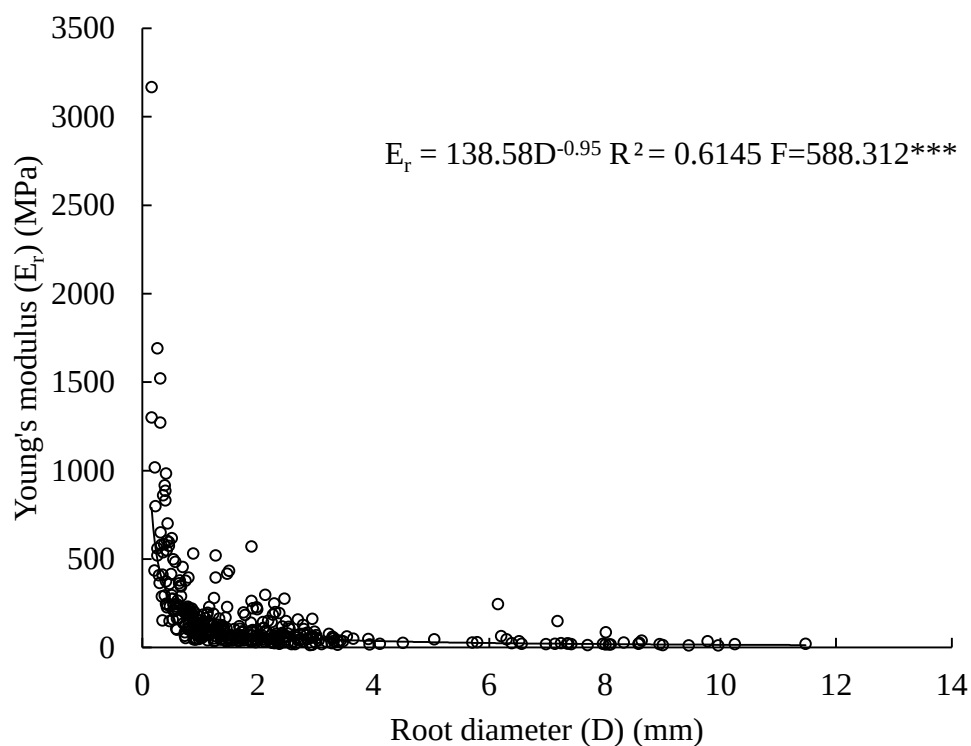


圖 4-34 蘆葦根徑與單根楊氏模數之關係及其迴歸曲線

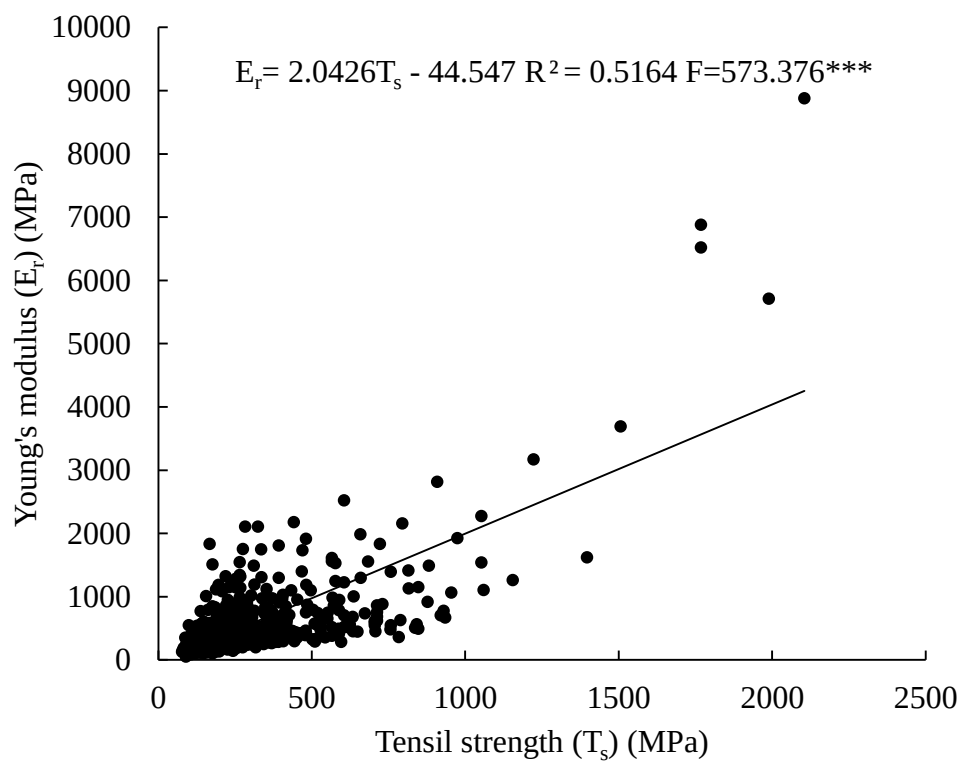


圖 4-35 甜根子單根抗拉強度與楊氏模數之關係及其迴歸曲線

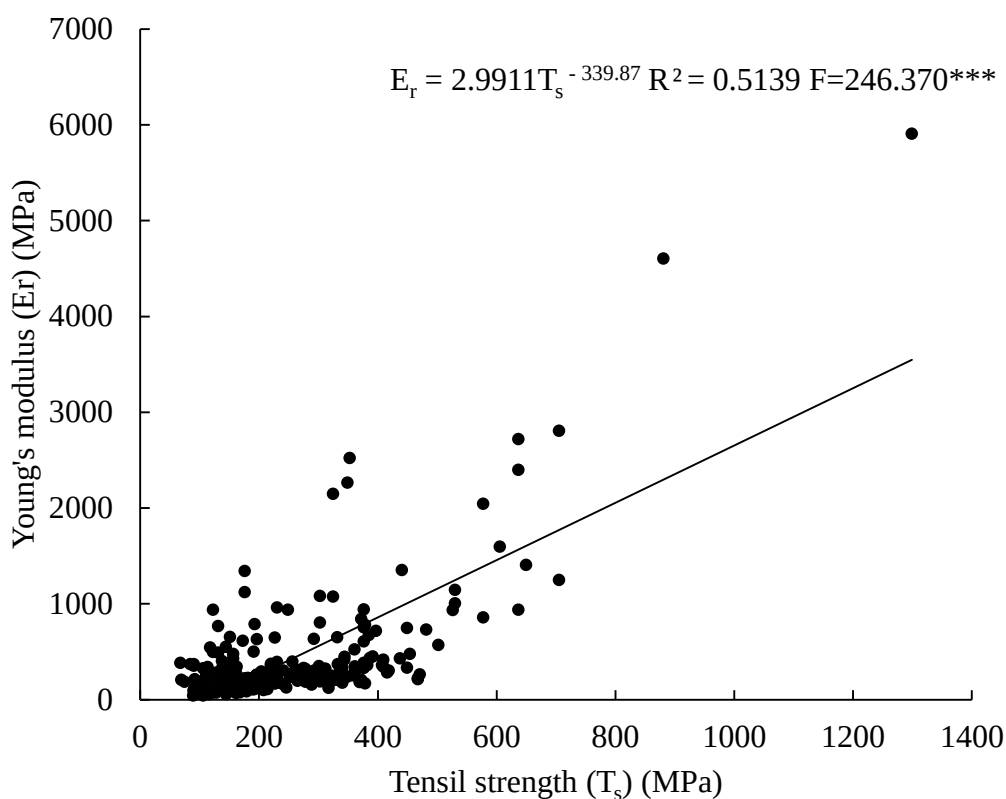


圖 4-36 臺灣蘆竹單根抗拉強度與楊氏模數之關係及其迴歸曲線

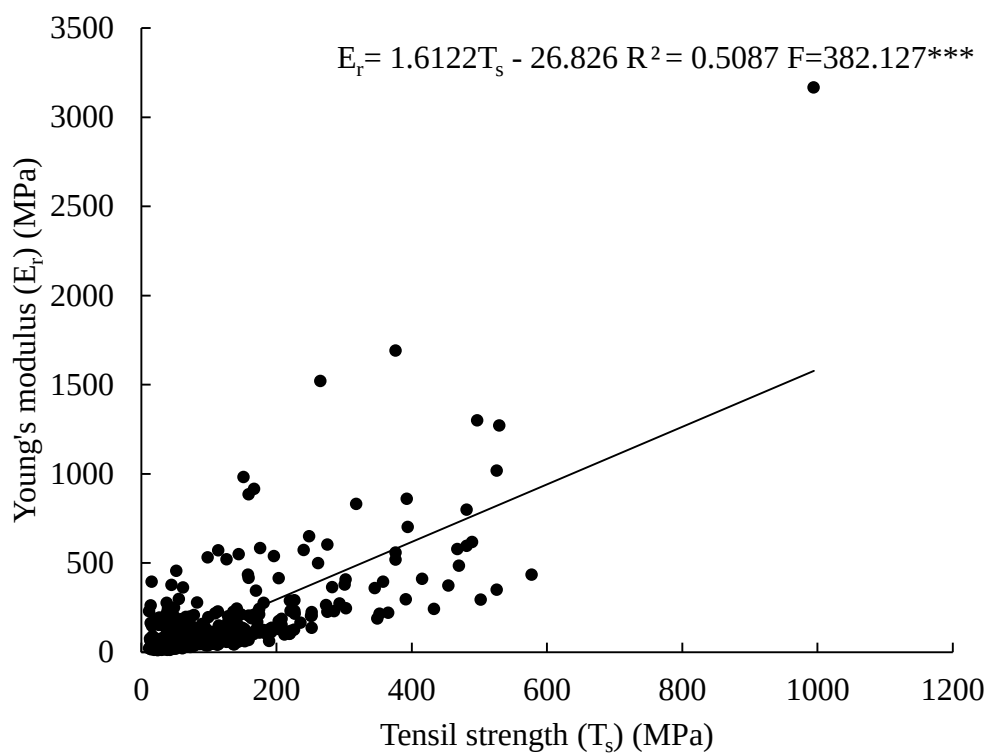


圖 4-37 蘆葦單根抗拉強度與楊氏模數之關係及其迴歸曲線

第五節小結

在本研究結果可發現在小苗扦插及移苗時，臺灣蘆竹有最好的表現，植物地上部和根系生長狀況則以甜根子最優。在風洞試驗的結果顯示各草種皆可良好抑制風蝕程度，但三草種無明顯特別優異者，在低風速或高植株覆蓋度時，臺灣蘆竹有較好的表現，若處高風速低植株覆蓋度狀況，蘆葦和甜根子具有較佳之表現。根系力學方面，甜根子大多擁有較佳力學強度，顯示其根系較能增強土體之力學性質。

第五章 結論與建議

第一節 結論

臺灣部分河川於東北季風吹襲時常導致飛砂問題，對附近居民造成生活上之影響，因此飛砂防治為相關單位之重要工作。目前常採用治理方式有水覆蓋、綠覆蓋、鋪設稻草蓆及防塵網，除綠覆蓋外大多治理方式屬短期防治措施，遇颱風大雨即沖毀，因此採用種植地被植物較可達到長期防制效果。本研究針對常見於河川及河口之三種草種進行之試驗結果得到之結論如下所述：

- 一、綠覆蓋治理成功與否和植株種類之選用有直接相關，應優先考慮栽種目標在治理地之生長狀況和存活率。小苗扦插培育方面臺灣蘆竹較容易存活，現地栽種小苗存活率亦較高，可大量繁殖栽種於治理地上，不易因土壤含水率低導致乾死，可提高治理成功率。
- 二、試驗草種之生長試驗結果可知，各草種之野外生長狀況均較苗圃來的好，若以野外生長之高度作為成熟植株之高度，可發現種植於苗圃生長 6 個月之草種，較接近成熟階段。另現地根系調查與苗圃種植者比較，發現其長度差異不大。
- 三、在植株高度生長上，甜根子在苗圃和現地至少可達 3 m，蘆葦大約在 2 m 附近，臺灣蘆竹約 1 m，以甜根子有較高的攔阻飛砂高度；根系長度也是甜根子可達最長深度 125 cm，次之為蘆葦 113 cm，最後為臺灣蘆竹 90 cm，說明甜根子有最深之土壤加固範圍。

- 四、臺灣蘆竹於低風速(6.3 m/s)或高植株覆蓋率(80%)時有最好的抗風蝕能力，而甜根子和蘆葦在高風速(10.8 m/s)和低植株覆蓋率(20%)的情況下與臺灣蘆竹相比有更優之抗風蝕能力。
- 五、透過直剪試驗得知甜根子所能提供的抗剪強度增量為最大，接著為蘆葦，最小為臺灣蘆竹。
- 六、因植株栽種於河岸旁，溪流如暴漲常遭受連根拔起，若植株本身具較高的抗拉拔能力，較能抵抗此逆境。由抗拉拔試驗可知，甜根子有最佳抗拉拔力，再者為蘆葦，臺灣蘆竹則是最小。
- 七、藉由單根拉伸試驗，可了解各試驗草種單根之抗拉能力和楊氏係數。單根抗拉力而言蘆葦的抗拉能力最強，接著為甜根子，臺灣蘆竹最低；楊氏係數由大到小分別為甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦。

表 5-1 三物種生長情形與各項能力統整

組別	細項	甜根子	臺灣蘆竹	蘆葦
植株生長情形	扦插繁殖成功率	次之	佳	普通
	現地移植成功率	普通	佳	次之
	植株地上部生長	佳	普通	次之
	根系生長	佳	普通	次之
減緩風速能力	高風速高植株覆蓋度	次之	佳	普通
	高風速低植株覆蓋度	佳	普通	次之
	低風速高植株覆蓋度	普通	佳	次之
	低風速低植株覆蓋度	次之	普通	佳
抗風蝕能力	高風速高植株覆蓋度	次之	佳	普通
	高風速低植株覆蓋度	佳	普通	次之
	低風速高植株覆蓋度	普通	佳	次之
	低風速低植株覆蓋度	次之	佳	普通
根系分布與力學	根系垂直生長潛力	佳	普通	次之
	根系繁茂程度	佳	普通	次之
	抗剪強度	佳	普通	次之
	抗拉拔能力	佳	普通	次之
	單根拉伸強度	佳	次之	普通

第二節建議

本計畫研究甜根子、臺灣蘆竹和蘆葦在不同應用範圍各有其優劣，在訂定治理目標與了解完治理地土壤性質與氣候之後可選出最適目標草種，本計畫建議幾種常見環境條件與適合栽種之物種供參考：

- 一、在裸露地初期可採用臺灣蘆竹進行治理，惟須注意植株覆蓋度不可過低(至少要大於 20%，強風地區大於 40%)，否則達不到最大抑制效果。

- 二、如治理工法搭配水覆蓋進行可選擇甜根子為種植對象，在治理初期低覆蓋度(20%)時有良好的抗風蝕效果與降低風速，也可提供較優的土壤加勁能力，穩定表層土壤。
- 三、在出海口附近之河岸，蘆葦為第一選擇，考量因素為蘆葦本身為耐鹽害之草種，也是濱海地區常見物種，較能適應鹽度高之河岸環境。
- 四、若河岸地質較為脆弱建議可採蘆葦或甜根子進行治理，因其根系力學能力佳，可提供優良之加勁能力，若考慮物種多樣性，也可將兩草種混植。
- 五、栽種方式可採分區之方式進行，靠近河岸處以蘆葦和甜根子為主，以降低風速為主，且因這兩物種植株較高能有較廣的垂直抑制風速範圍，在其植株後種植臺灣蘆竹用以意志和攔阻飛砂以達最佳治理效果。
- 六、臺灣春季及夏季初期 3-5 月是生長開始之時期，此時扦插為最佳時期，較容易發根成功。

參考文獻

1. 水利署第八河川局，“卑南溪河口段風砂問題改善對策初步探討”，2008。
2. 江永哲、黃隆明、邱啟芳，“澎湖海岸防風構造物之研究(I)海岸防風林與防風牆之防風防鹽功效比較實驗”，中華水土保持學報，第1期，第19卷，3-27頁，1988。
3. 李華坦、胡夏嵩、趙玉嬌、盧海靜、李國榮、朱海麗，“植物根系增強土體抗剪強度機理研究進展”，人民黃河，第8期，第36卷，97-100頁，2014。
4. 周德培、張俊云，植被護坡工程技術，人民交通出版社，322頁，2003。
5. 林信輝、江永哲，“砂體含水量與飛砂量之關係試驗”，第2期，第10卷，173-193頁，1979。
6. 林德貴、劉昱麟、王勝賢、劉文宗，“烏溪出海口河床裸露地之揚塵災害分析及抑制工法有效性評估”，中國土木水利工程學刊，第2期，第24卷，147-156頁，2012。
7. 洪祖健、王勝賢、林德貴，“河床裸露地揚塵抑制工法之效益評估”，社團法人中華水土保持學會103年度年會，十二月六日，中興大學，臺中，臺灣，2014。
8. 張興玲、胡夏嵩，“青藏高原東北部黃土區草本植物根系加筋土的抗剪特性”，水土保持通報，第4期，第33卷，186-188頁，2013。
9. 陳威廷、何坤益，“臺灣西海岸河口揚塵改善與經營對策”，林業研究專訊，第4期，第18卷，31-34頁，2011。
10. 黃隆明、周廷韋、李霽修、陳財輝，“防風林配置對定砂效果

- 之研究”，農林學報，第 1 期，第 63 卷，1-14 頁，2014。
- 11.黃隆明、吳昌翰，“臺中港海岸飛砂量推估之探討”，水土保持學報，第 4 期，第 42 卷，393-407 頁，2010。
 - 12.黃隆明、吳昌翰、陳財輝，“苗栗縣苑裡鎮海岸飛砂量之推估”，農林學報，第 4 期，第 59 卷，301-312 頁，2010。
 - 13.黃隆明、陳天慈、范姜明威，“臺灣中部河口飛砂及揚塵之調查與研究”，水土保持學報，第 3 期，第 43 卷，259-276 頁，2011。
 - 14.黃隆明、盧力瑋、陳財輝，“飛砂移動機制之風洞試驗”，農林學報，第 3 期，第 59 卷，199-213 頁，2010。
 - 15.楊亞川、莫永京、王芝芳，“土壤-草本植被根系複合體抗水蝕強度與抗剪強度的試驗研究”，中國農業大學學報，第 2 期，31-38 頁，1996。
 - 16.經濟部水利署，“中央管河川揚塵改善評估分析”，2016。
 - 17.經濟部水利署，“濁水溪下游揚塵改善計畫研究(2/2)”，2011。
 - 18.董治寶、陳渭南、董光榮、陳廣庭、李振山、楊佐濤，“植被對風砂土風蝕作用之影響”，環境科學學報，第 4 期，第 16 卷，437-443 頁，1996。
 - 19.熊燕梅、夏漢平、李志安，“植物根系護坡抗蝕的效應與機理研究進展”，應用生態學報，第 4 期，第 18 卷，895-904 頁，2007。
 - 20.趙麗兵、張寶貴、蘇志珠，“草本植物根系增強土壤抗剪切強度的量化研究”，中國生態農業學報，第 3 期，第 16 卷，718-722 頁，2008。
 - 21.劉剛、李紅麗、董智、李永強、崔貴生，“黃河故道風砂區牧草控制風蝕效果的研究”，中國草地學報，第 1 期，61-64 頁，2007。
 - 22.劉連友、劉玉璋、李小雁、王建華、彭海梅，“礫石覆蓋對土壤

- 吹蝕的抑制效應”，中國沙漠，第 1 期，第 19 卷，60-62 頁，1999。
- 23.鍾榮華、鮑玉海、賀秀斌、高進長、閻丹丹、李峪、王銘鋒，“三峽水庫消落帶四種草本根系抗拉特性及其根系黏聚力”，水土保持學報，第 4 期，188-194 頁，2015。
- 24.Cheng, H., C. Liu, X. Zou, H. Li, L. Kang, B. Liu,“Wind erosion rate for vegetated soil cover: A prediction model based on surface shear strength,” Catena, No. 187, pp. 1-7,2020.
- 25.Devrani R., A. A.Dubey , K. Ravi, L. Sahoo,“Applications of bio-cementation and bio-polymerization for aeolian erosion control,” Journal of Arid Environments, No. 187, pp. 1-12, 2021.
- 26.Hathaway, R. L. and D. Penny,“Root strength in some Populus and Salix clones,” New Zealand Journal of Botany Vol.3, No. 13, pp. 333-344, 1975.
- 27.Huang W. P., J. Z. Yim,“Sand dune restoration experiments at Bei-Men Coast, Taiwan, ” Ecological Engineering, No.73, pp. 409-420, 2014.
- 28.Lee J.-T., L.-Z. Yen , M.-Y. Chu , Y.-S. Lin , C.-C. Chang,R.-S. Lin, K.-H. Chao and M.-J. Lee, “Growth Characteristics and Anti-Wind ErosionAbility of Three Tropical Foredune Pioneer Species for Sand Dune Stabilization,” Sustainability No. 12, pp.1-15, 2020.
- 29.Loia C.-Y., H. K. Tirkolaeib, M. Huaa, I. M. D. Rosaa, L. Carlsonc, E. Kavazanjian Jr., X. Hea,“Durable and ductile double-network material for dust control,” Geoderma, No. 361, pp. 1-10, 2020.
- 30.Marden M, D. Rowan, C. Phillips,“Stabilising characteristics of New Zealand indigenous riparian colonising plants,” Plant and Soil, No. 278, pp.95-105, 2005.
- 31.Pohl1, M., R. Stroude, A. Buttler and C. Rixen, “Functional traits

- and root morphology of alpine plants,” *Annals of Botany*, No. 108, pp. 537-545, 2011.
32. Thornes, J. B., *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, Wiley, 536 Pages, 1990.
33. Van de Ven, T. A. M., D. W. Fryrear and W. P. Spaan, “Vegetation characteristics and soil loss by wind, ” *Journal of Soil and Water Conservation* Vol. 4, No. 44, pp. 347-349, 1989.
34. Wolfe, S. A. and W. G. Nickling, “The protective role of sparse vegetation in wind erosion,” *Progress in Physical Geography* Vol. 1, No. 17, pp. 50-68, 1993.

附錄

附錄一 期末審查意見回覆

項次	審查意見	審查意見回覆
1	計畫成果很有價值，能減少河口飛砂，期待實務上的應用。	感謝委員稱讚，期待本研究可對飛砂防治有所助益。
2	圖 4-15 請標明蘆葦、臺灣蘆竹及甜根子各為何者。	感謝委員指正，已將標示於圖 4-15 中補充之。
3	建議結論部分增加 3 種草種試驗結果比較表。	感謝委員建議，已新增表 5-1 於結論中。
4	建議補充各個試驗採用的試驗設計方法。	感謝委員建議，已將相關內容新增於第三章中。
5	台灣蘆竹適合生長在海拔 1800 公尺以下山區，或海岸溼地及內陸岩壁，較不適合在河床上，請問是否植物名稱誤植？	感謝委員提問，本試驗草種確實為臺灣蘆竹，採自阿里山地區，在本研究中該物種仍可生長在較為乾燥之沙土中，因此認為有應用之可能性。
6	所選試驗植物無商業種子，以扦插為主，其適合栽種季節為何？	感謝委員提問，植物生長季為春、夏二季，因此適合在此季節進行扦插以利植物成功發根；已補述於第五章第二節「建議」中。
7	蘆葦雖為耐鹽害之草種，是否容易對周遭居民產生過敏源？	感謝委員提問，蘆葦之花絮確實為草花本粉過敏原之一(Gangl <i>et al.</i> , 2013)，但以嘉義八掌溪的忠義橋為例，附近有大量甜根子生長，且該物種也具有類似花絮構造，不過附近居民過敏反應並不高，若在實際應用時仍可提醒或宣導何時為花絮盛開季節，讓呼吸道易敏感之群眾可以提早預防。

附錄二 期中審查意見回覆

項次	審查意見	審查意見回覆
1	請補附"摘要"，敘明已獲致初步成果、後續擬進行之相關研究、遭遇困難及解決對策等。	感謝委員指正，已補附摘要。
2	研究初步成果：種植樹木及地被植物，可達到長期防制效果，但目前法規有相關限制條件，如河川管理辦法第37條之高度限制等，請一併探討研究成果之適法性，以利運用。	感謝委員建議，因本試驗植株高於河川管理辦法第37條規定高度，因此在堤腳、防洪牆、護岸或堤防附屬建造物臨水面二十公尺以內之區域不得種植，若要再高灘綠美化地種植，需有計畫許可。
3	P3-10 目前植株覆蓋度係以正射影方式進行拍照，並輔以 Image J 軟體分析，未來於現地是否亦可以此方式評估？	感謝委員提問，根據張逸群等(2012)研究指出 Image J 中顏色模型分量和植物生長狀況的相關係數達 0.89，顯示利用顏色模型分量灰階值可作為估算植草生長存活率之用。
4	本研究成果後續是否可以簡表或簡圖方式呈現，亦即使用者可簡單快速評估在多大風速時，多少覆蓋度可以減少多少風蝕率？	本研究後續統計分析可得出在 6.3m/s 和 10.8m/s 風速下不同覆蓋度的風蝕率回歸式，此回歸式可用於預估風蝕率，但因目前實驗風只有 6.3m/s 及 10.8m/s 兩種，因此無法得知在這兩種風速之外的結果。
5	風洞試驗用二種風速 6.3m/s 及 10m/s 之用意為何？此為河口最常發生之風速嗎？圖 4-11 及圖 4-12 標示之風速為 6.3m/s 及 10.8m/s 是否有誤，請釐清。(p4-8、p4-9、p4-10)	感謝委員指正，本研究風速採用為 6.3m/s 及 10.8m/s，黃隆明等(2010)指出砂粒粒徑介於 0.15~0.84 mm 時，其起始風速為 5.5~7 m/s，而本計畫大部分粒徑位於該範圍故取其中間值(約 6.3)；海岸地形平坦，在無障礙下風速可達 10~15 m/s，因此取 10.8m/s，於第三章第

		三節新增論述之。
6	風洞試驗本計畫只有三種草種，期中階段只試驗二種(甜根子草、臺灣蘆竹)，何不三種同時試驗？若不同時期試驗，第三種(蘆葦)試驗時成長期間較長，是否影響試驗結果？	感謝委員提問，因蘆葦採種培育時間較晚，為使三物種生長時間一致，故較晚進行風蝕試驗，以避免因生長期長短之差異影響所造成之實驗誤差，已將資料於內文中第三章第三節新增。
7	圖 3-13 現地實驗「根系型態與分布調查」和苗圃及室內實驗「根系型態與分布調查」比對後之流程為何？請補充。(p3-14)	感謝委員提問，因第二次補植仍被大雨沖走，因此決定與現地自然生長植物直接挖出比較，在根系型態部分有肉眼辨識看有無異同，另外記錄現地與苗圃生長狀況(株高、根長)有無差異，可用於探討土箱對於植株是否造成生長受限，已將資料於第三章新增。
8	報告書封面計畫編號請修正為 SWCB-110-030。	感謝委員指正，已於報告內修改。
9	計畫調查之土樣粒徑分布(P3-1)資料建議依本局數值資料格式提供，以納入本局數值資料庫。	感謝委員建議，已將調查之土樣按照貴局提供之格式新增於文內附錄二。
10	根系觀察與力學試驗組每 1 草種種植 1 株於 24 箱，剪力及拉拔試驗每 1 草種各 12 株(共 24 箱)。根系型態觀察是採用哪個樣本？	感謝委員提問，剪力試驗與拉拔試驗相比在過程中根系位移不明顯，較不容易使根系觀察產生錯誤，因此選擇剪力試驗組。
11	表 3-2 不同植株覆蓋度分布狀況，為何沒有蘆葦？	感謝委員提問，與風蝕試驗原因一樣，為使三物種生長期一致，故較晚進行試驗，並已將資料於內文中第三章第三節新增。。
12	P4-1 20201 年請更正年度。	感謝委員提醒，並於報告內修改完畢。

附錄三 土樣粒徑分布

取 樣 名 稱	坐 標 系 統	取 樣 坐 標 _X	取樣坐標 _Y	土 壤 比 重	土 壤 單 位 重(t/m ³)	土 壤 孔 隙 率(%)	孔 隙 比	土 壤 含 水 量(%)	礫石個 別留篩 百分比 (%)	砂土個 別留篩 百分比 (%)	粉土個 別留篩 百分比 (%)	黏 土 個 別 留 篩 百 分 比(%)	液 性 限 度 (%)	塑 性 指 數	土 壤 分 類 USCS
1	TWD97	160993.417	2584416.017	2.64	-	-	-	0	0	98.8	1.2	0	-	-	SP

編號	縣市別	鄉鎮	村里	子集水區	TWD97_X	TWD97_Y	調查類型	計畫年度 (西元)	執行單位	計畫名稱	取樣日期 (年/月/日)
龍宮溪 1	嘉義縣	布袋鎮	好美里	布袋沿海	160993.417	2584416.017	樣孔粒徑	2020	國立嘉義 大學	(應用於河口飛砂區 抗風蝕草種之研究)	2021/1/2
D10 (mm)	D16 (mm)	D20 (mm)	D30 (mm)	D40 (mm)	D50 (mm)	D65 (mm)	D75 (mm)	D84 (mm)	D90 (mm)	D95 (mm)	Dmax (mm)
0.11	0.14	0.15	0.18	0.19	0.22	0.26	0.28	0.33	0.34	0.35	0.42
備註： 特徵粒徑由圖表求得											

附錄四 期初審查意見回覆

項次	審查意見	審查意見回覆
1	緒論述及 PM ₁₀ 可進入人體肺部，與一般認知有所差異，並請說明揚塵是否有 PM _{2.5} 來源。	感謝委員指正，飛砂及揚塵會使空氣中的 PM ₁₀ 含量增加，而非 PM _{2.5} 的增加，已修正於緒論中。
2	卑南溪等經歷年試驗處理已略見抑制揚塵成效，請瞭解其工法。	感謝委員建議，經參考後已將其加入內文中第二章第四節。
3	草類根系與喬木差異性其大，種植於樣本箱需探討其生長之限制性。	感謝委員建議，因草本根系與木本相比而言來得較為淺，推測其限制性較不嚴重；另外在後續實驗根系性狀觀察時，可透過是否有盤根現象，了解樣本箱是否對植物生長造成限制。
4	目前所採用之草種於河川是否為是為最優勢植物，建議改種植五節芒之引入選用。	感謝委員建議，經本團隊至八掌溪調查結果，其生長較佳之優勢草種為目前本計畫採用之三種草種；至於五節芒或許未來可做延續之研究。
5	請蒐集國內外有關揚塵控制之試驗處理方法、成效	感謝委員建議，此參考相關治理方式及了解其成效，並於內文中第二章第四節新增論述之。
6	草種之選擇與試區試驗是否考慮海口土壤鹽分較高、土壤水分較少之適宜性，觀察期生長狀況？	感謝委員建議，此三種草種耐旱性高，且蘆葦耐鹽性強，且在八掌溪現地生長良好。
7	植株拉拔試驗之目的何在？宜考慮海岸風力環境造成土砂移動阻截之效應，以凸顯植株之適地性？	感謝委員建議，種植在河岸旁的植物常在汛期時遭大雨沖刷或是東風季風強烈時會受風吹倒伏，因此了解植株抗拉拔力有助於植栽選擇時加以考量。 另關於攔截土砂或降低風蝕之

		能力會在風蝕試驗中進行探討。
8	試區試驗之處理與重複配置如何？採取何種統計分析方法？(即試驗設計之內容宜明確，以利統計分析。)	感謝委員意見，根系力學與觀察試驗重複組數為 12 組，風洞試驗為 10 組，現地種植及觀察為 4 組，在統計分析方面將會採用單因子變異數分析(ANOVA)。相關內容已補充於內文中第三章第一節中。
9	根系觀察、力學試驗、風蝕試驗各組草株，是否須分不同成長時間分別測試？或是以何種標準做為測試時機？	感謝委員意見，根系觀察與力學試驗組為 6 個月，考慮在實際應用時約在春夏進行種植，並在秋冬東北季風盛行時提供飛砂抑制效果故訂之。風蝕試驗組為 4 個月，原因為約在 4 個月後植株覆蓋度大約不再變動。
10	風蝕試驗之變因除草種，植被覆蓋率及風速外，含水率亦為關鍵因素，此部分如何納入考量？	感謝委員意見，在風蝕試驗前 1-2 個禮拜會停止澆水，並於試驗前須測定試驗箱表層砂土含水率介於 1~1.2% 才會進行試驗。
11	風蝕試驗時，如何控制含水量此變因，以確保部不同草種之生長槽含水率一致？	感謝委員意見，在風蝕試驗前 1-2 個禮拜會停止澆水，並於試驗前須測定試驗箱表層砂土含水率，若太高則進行日曬，以降低其含水率。
12	風蝕試驗之風速是考慮分級測試？使用 14.2 m/s 之理由為何？	感謝委員意見，14.2 m/s 為風洞口初速，因本試驗採用之風洞機為固定風速，因此風速是藉由距離調整。 本研究採用 6.3 和 10.8 m/s 之風速，原因為 6-7 m/s 為本研究採用砂土之砂粒運動的起始風速範圍，游繁結教授(1986)指出風速經常在 10~15 m/s 之間，因此採用 10.8 m/s。
13	請補附前次審查意見之回復情形	感謝委員意見，已新增期初審查意見回復，謝謝提醒。

14	草種選擇臺灣蘆竹、蘆葦、甜根子草理由為何？其植物根系各為何種類型？	感謝委員意見，此三種植物為八掌溪常見優勢草種，且目前臺灣治理多也採用甜根子作為選用草種，蘆葦則為耐鹽性良好之草種，且蘆竹植株抗拉力能力強(黃志偉，2005)，若以顏正平教授(2005)年分類方法因此三種皆為草本為團網型，但若採用本研究方法需後續根系觀察時才能進行根系分類。
15	不同河流其土壤不同，抗風蝕草種是否有適應性之考量？以適合當地生長之草種為主。	感謝委員意見，本研究採用八掌溪常見草種，且目前採用的三草種為臺灣全島常見物種因此適應性較廣。

附錄五 創新研究補助計畫會辦明細表

序號	計畫中文名稱	研提機關名稱	計畫主持人	核定補助款(元)
1	應用於河口飛砂區 抗風蝕草種之研究	國立嘉義大學	李嶸泰	518,000
業務單位(組、中心、小組)審查意見			回覆意見	
一、有關計畫書格式及經費審查部分： 1.本計畫請以補助經 518 仟元調整編列。 2.本年度執行期限請修正為自 110 年 1 月 27 日至 110 年 12 月 31 日。(11.1 個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限 11.1 個月內編列。年終獎金亦配合計畫期限比例調整。 3.「資訊服務費」應以與計畫直接相關者為限，屬年度例行之保養、維護費用，原則應自行負擔不得編列。			一、有關計畫書格式及經費審查部分： 1.本計畫已依補助經費 518 仟元調整編列。 2.本年度執行期限已修正。薪俸、主持人費、兼任研究助理，已以計畫執行期限 11.1 個月內編列。 3.資訊服務費已刪除。	
二、為配合本局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分： 1.本計畫擬收集三種常見河濱植物，於試驗場培植，並進行抗拉及風洞實驗，成果可提供河口抗風蝕草種選用之參考。 2.由於草種培育係於試驗場之控制環境，並有定期澆灌，與現地場域之實際土壤狀況及天候降雨差異較大，各項培育狀況宜考量現地可能狀態，較具實用性。另，培育條件宜考量氣候變遷狀況下，降雨可能減少之影響。			二、為配合貴局業務需求，計畫內容建議調整(或納入後續執行評估參考)部分： 1.本計畫擬收集蘆竹、蘆葦、甜根子草等三種常見河濱植物，於試驗場培植，並進行抗拉及風洞實驗，成果可提供河口抗風蝕草種選用之參考。 2.為考量現地可能狀況及研究計畫成果之實用性，選擇八掌溪出海口(嘉義縣布袋鎮好美里)之飛砂地，進行三草種植株之現地栽植試驗，以觀察三草種植株之現地生長及根系分布情形。另外，也採用相同方法進行三草種現地植栽之根系型態與分布調查觀察。已修正於計畫	

3.風洞試驗之各項參數宜參採氣象局等之觀測結果。 4.本計畫之草種取自八掌溪及朴子溪口，觀察力學性質及抗風蝕效果，似只能探討目前溪流河口植物之抗風蝕效果，只能瞭解目前各草種於河口砂土之生長特性，似乎無法解決目前冬季河口風砂大之困擾。 5.本計畫主題為河口飛砂之抗風草種研究，對於河口風蝕控制之研究有其實用性，如何應用於山坡地範圍？	說明書之實驗方法與步驟。 3.風洞試驗之各項參數將會參採氣象局之觀測結果。 4.本計畫旨在探討蘆竹、蘆葦、甜根子草等三種常見河濱植物之根系生長特徵與生物力學特性及其抗風蝕能力，期能將來應用於河口風砂揚塵改善之植生工程。 5.本計畫對河口風蝕控制之研究有其實用性，而在山坡地範圍則可依各草種之根系型態與分布及拉拔抗力等特性，選擇應用於坡地植生工程。
一、P4(五)重要工作項目：預算金額請修正。 二、「25-00 物品」單價未達一萬元之消耗或非消耗品購置費用屬之，請細分量化說明。 三、「26-10 雜支」請以明細表量化補充說明。 1. 六(五)工作項目數量應為處、項、組、式等工作數量單位，請修正。 2.物品，""剪力試驗儀之皮帶""明細計算有誤。 3.回覆意見請新增至公務預算計畫管理系統【研提單位意見回覆】內。	一、P4(五)重要工作項目：預算金額已修正。 二、「25-00 物品」已細分量化說明。 三、「26-10 雜支」已以明細表量化補充說明。
主計室審查意見	回覆意見
一、「按日按件計資酬金」應低於業務費 35% 二、「23-00 按日按件計資酬金」之工資，請註明學歷俾便審查。 三、「25-00 物品」4.剪力試驗儀之皮帶計算錯誤，請修正。 四、「26-10 雜支」4.會議餐點：請補列計量計價單位（個、元、次），「誤餐費」每個以 100 元為限。	一、感謝指正,已全數依意見修正完畢 二、感謝指正,已全數依意見修正完畢 三、感謝指正,已全數依意見修正完畢 四、感謝指正,已全數依意見修正完畢