

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別： 生物科

組 別： 國中組

作 品 名 稱： 大花咸豐草瘦果之單程稜傳播策略：
倒刺結構與力學脫離代價之量化研究

關 鍵 詞： 大花咸豐草、機械互鎖、生物力學

編 號： 115JA-B001

大花咸豐草瘦果之單程票傳播策略： 倒刺結構與力學脫離代價之量化研究

摘要

大花咸豐草瘦果具備極高效的傳播能力。本研究透過力學實驗與影像監測，量化其附著穩定性與脫離代價，提出「單程票傳播」模型。

研究發現其倒刺具導角設計與高韌性（屈服強度約 1.4–3.6 MPa），能有效緩衝應力。瘦果附著的安全係數極高（ $SF > 100$ ），抵抗生物主動拔除的力道高達自然慣性力的 416 倍。水分能軟化結構以提升留存率，但強行拔除會造成不可逆的毀損，證實其「易入難出」的特性。此外，結構受損雖不影響種子萌發潛力，但會顯著降低覆土環境的出土成功率並延遲出土時間。

結論指出，大花咸豐草以微觀倒刺的不可逆損毀（單程票代價）換取巨觀的高傳播穩定性，且受損後仍能保有定殖所需的生理韌性。

壹、前言

一、研究動機

大花咸豐草（*Bidens pilosa* var. *radiata*）作為全球性的強勢入侵物種，其成功擴張的核心在於極高效的種子傳播機制。這種依賴附著於動物體表的方式，是植物實現長距離擴散的主要途徑。然而，理想的傳播需面臨「附著穩定性」與「脫離機率」間的力學悖論：種子須對抗慣性衝擊，但又須在適當能量下脫離以接觸土壤。本研究將探討大花咸豐草如何透過倒刺的力學，在維持高動態穩定性的同時，達成特定條件下的強制脫離。

二、研究目的

本研究旨在透過跨尺度的力學實驗與物理建模，系統性解析大花咸豐草（*Bidens pilosa*）瘦果的附著韌性、結構安全性與脫離代價。具體研究目的如下：

1. **定量表徵倒刺之微觀幾何與材料屬性**：定義倒刺之關鍵幾何參數（如細長比 AR 、幾何脆弱指標 K ），並結合懸臂式感測系統實測與歐拉-白努利模型（Euler-Bernoulli model），反向推導倒刺組織之真實屈服強度（ σ_y ）。
2. **解析「微觀屈服」與「系統失效」之階層力學特徵**：探討單一倒刺之起始屈服門檻（微觀失效）與整體瘦果極限承载力（系統失效）間之量級差異，解析倒刺如何透過組織韌性與後屈服強度建構多層次的力學緩衝機制。
3. **建立附著深度與結構鎖定效率之最佳化模型**：探討嵌入深度與承重能力間的非線性耦合關係，利用「承重-有效倒刺比」（LEBR）量化不同深度下之機械鎖定效率，藉此定義瘦果附著之物理最佳平衡點。
4. **量化動態環境下之留存穩定性與安全係數（ SF ）**：模擬宿主在不同運動強度下之加速度負荷（G-force），建立生存曲線矩陣。透過對比靜態脫離力與動態慣性力，定義瘦果對抗甩落之安全係數（ SF ），量化其在複雜震動場景下之生存極限。
5. **驗證「單程票」傳播之環境適應與演化策略**：透過二因子交叉實驗解析水分對倒刺「剛性-韌性」切換之調節作用。並利用 Python 撰寫之自動化觀測腳本，建立高時間解析度之影像序列，藉此量化結構損毀對種子萌發動力學（發芽率、出土速率）的生物學代價，驗證大花咸豐草以結構不可逆犧牲換取傳播穩定性之演化邏輯。

貳、研究設備與材料

一、 樣本篩選與預處理

① 篩選標準：

- 選擇成熟且具備「兩根芒」的瘦果，每根芒長度至少 ≥ 2.0 cm。為了減少變異，本實驗主要選用具較強附著潛力的「中央瘦果」（Zhang et al., 2019）。
- **排除條件**：若芒數量為三根（變異）或已有明顯損壞（斷裂/彎曲）則予以排除。
- **數據記錄**：記錄每次採集的瘦果團中合格瘦果的比例，統計後為 64.37% 的合格率。

② 多果團混合抽樣法：

- **來源紀錄**：採集來自同一植株、生長環境相似之 3-5 個瘦果團。
- **混合隨機化**：將所有符合篩選標準之瘦果置於合併中進行「樣本池化」。測試時由樣本池中隨機抽取種子分配至各實驗組。

③ 顯微檢查：使用顯微鏡觀察芒的完整性，確保尖端無微觀下的磨損或缺角。

- ④ **樣本固定**：將瘦果以膠帶黏貼於卡紙上，露出約 5 mm 的芒部分（黏貼深度約佔瘦果長度的 1/2），確保受力區段一致。

二、 測量儀器

(一) 懸臂式微力感測器

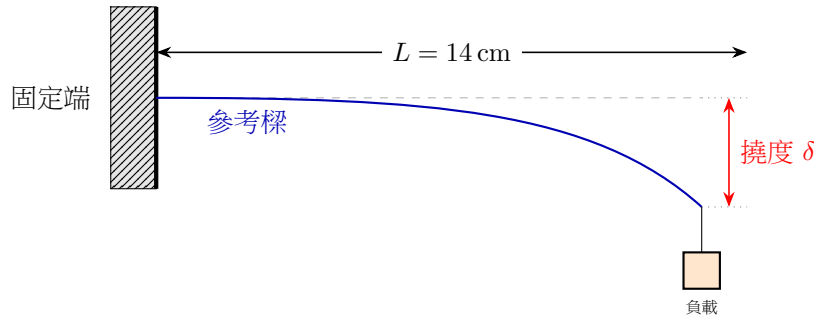


圖 1. 懸臂式微力感測器之物理模型與標定原理。參考樑由長度 $L = 14 \text{ cm}$ 之電吉他弦構成，透過量測末端撓度 δ 換算作用力。（本圖由作者繪製）

本研究開發一套「懸臂式微力感測器」，利用參考懸臂樑法將微小位移轉化為毫牛頓等級之力，見圖 1。

其原理是利用性質穩定且彈性適中的 **電吉他第 1 弦（鋼弦）** 作為參考樑，在梁末端利用小段膠帶固定一段人類毛髮環圈作為施力點，勾掛特定重量後，量測該樑受力後的 **淨撓度** Δ_{net} ，再結合標定所得之勁度係數 k ，即可利用撓度計算毫牛頓 (mN) 等級之微小作用力：

$$F = k \cdot \Delta_{\text{net}} \quad (1)$$

1. **參考樑之標定** 為求取精確的 k 值，本實驗採用銅線標定法：

- ① **標定物**：使用經電子秤精確稱量之高純度銅線，計算其單位長度質量 ρ 。
- ② **數據量測**：記錄參考樑在空載下的基準位置（初始撓度 δ_0 ），並掛載不同長度之銅線，測得不同重量與撓度的關係。
- ③ **統計分析**：透過線性迴歸所得的斜率，經重力加速度換算即為 k (mN/cm)。同時，進行 **殘差分析 (Residual Analysis)** 檢驗線性度，確保在測試區間內參考樑未發生幾何非線性形變。

依據歐拉-白努利樑理論 (Euler-Bernoulli Beam Theory)，當末端撓度 δ 小於樑長之十分之一（即 $\delta < 1.4 \text{ cm}$ ）時，樑之幾何非線性效應可忽略，力與位移呈線性比例關係。若最大撓度超過此值，則需考慮非線性修正，但經實驗結果顯示，本實驗最大撓度未超過此值，故可忽略非線性修正。

(二) 改裝式顯微鏡與電子秤

利用調節輪精確控制瘦果的上下移動高度（精度達微米等級），並透過電子秤用於即時記錄拉拔過程中的重量變化，精確測量最大承重力（解析度 1 g）。如圖 2 所示。

(三) Arduino 動態模擬系統

Arduino Uno 開發板 + Sensor Shield V2 擴充板控制伺服馬達與擺臂，用以模擬宿主運動。如 3 所示。



圖 2. 改裝式顯微鏡與電子秤。（本圖由作者拍攝）

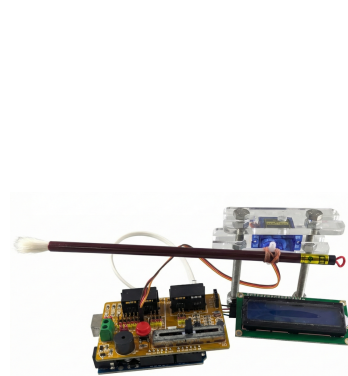


圖 3. Arduino 動態模擬系統。（本圖由作者拍攝）

(四) 衝擊實驗組件

衝擊實驗組件包含以下組件：主載重螺帽與迴紋針（2.66 g）、預載重物迴紋針（0.36 g）、高剛性尼龍魚線（30 cm）、模擬纖維用棉線、長尾夾、卡紙與高度標尺。

(五) 萌發影像監測系統

本研究透過筆記型電腦連接攝影機，並撰寫 Python 腳本進行定時任務控制。設定每 5 分鐘觸發一次快門自動拍攝，確保捕捉到胚根突破種皮（發芽）或子葉突破土表（出土）的精確瞬時時刻。

三、 實驗材料

本研究使用基礎耗材如卡紙、標準棉線、膠帶、螺帽等。接觸介質採用毛筆或畫筆的兔毫（細軟毛）、狼毫（中等毛）、尼龍（光滑纖維），以及棉線（螺旋撚合結構）等。

在各階段實驗中多採棉線作為主要接觸介質，其選用原因基於力學標準化與生態模擬之考量。

在初期量化「最佳附著深度」與「最大承重極限」時，需要一種具備高附著成功率且結構穩定的介質。棉線的結構能與瘦果倒刺產生立體鎖定。相較於平滑的尼龍纖維

或變異性大的生物毛髮，棉線能確保在基礎力學測試中提供高度的可重複性，降低因介質滑移造成的實驗誤差。

此外，棉質纖維是日常衣物中常見的成分，特別是襪子、鞋帶與褲管等易於接觸地面草叢的部位。使用棉線作為模擬介質，能有效模擬瘦果附著於人造織物後的力學回饋，提升實驗結果在生態擴散研究上的應用價值與擬真度。

參、研究方法

本研究採取多階段實驗，從顯微觀察、基礎力學建立、環境動態、能量損耗、環境濕度、生物介入與萌發表現，建構大花咸豐草瘦果的附著與脫離模型：

- **顯微觀察**：觀察單一細胞的型態並進行測量，並觀察倒刺的失效形態與水分回復機制。
- **倒刺建模**：利用懸臂梁模型，建立倒刺的力學模型。
- **力學測量**：透過懸臂式微力感測器，量測單一倒刺的承重極限。
- **靜態拉拔**：建立不同嵌入深度下之基礎附著力與倒刺損耗數據。
- **動態模擬**：利用伺服馬達模擬宿主運動（行走至快跑）下之附著穩定性。
- **衝擊實驗**：模擬脫離過程之動量交換，量化累積能量對結構之破壞規律。
- **環境濕度**：驗證環境水分對倒刺剛性之調節效應及交互作用。
- **生物介入**：建立生物介入（理毛、手撥）之受力閾值，與自然力進行對比。
- **萌發表現**：建立不同環境下之萌芽與出土動力學曲線，量化克服環境阻力之能力。

一、 顯微觀察

本研究利用解剖顯微鏡與複式顯微鏡觀察倒刺的型態，並以 ImageJ 量測顯微影像。

(一) 形態特徵之參數定義

為量化倒刺之微觀幾何，本研究定義四項基礎參數：長度 (L)、寬度 (w)、厚度 (t) 與夾角 (θ)。並定義「細長比 (AR)」為倒刺長度 L 與厚度 t 之比值 ($AR = L/t$)。

(二) 單點毛髮交連裝置

並透過單點毛髮交連裝置，使單一倒刺與毛髮發生鉤掛，觀察其受力後的幾何變化。此外也將芒插入棉線中再拔除，觀察系統性倒刺失效模式，並定義功能性失效標準。

- ① **單點毛髮交連裝置**：選用直徑約 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 之人類毛髮（具高抗拉剛性），兩端以膠帶緊繃黏貼於卡紙。
- ② **微觀觀察**：在解剖顯微鏡下，以鑷子夾持瘦果，使單一倒刺細胞與毛髮發生鉤掛。

- ③ **失效誘發**：施加外力直至倒刺發生形態改變，觀察並分類其失效模式（如：韌性彎曲、局部挫屈）。

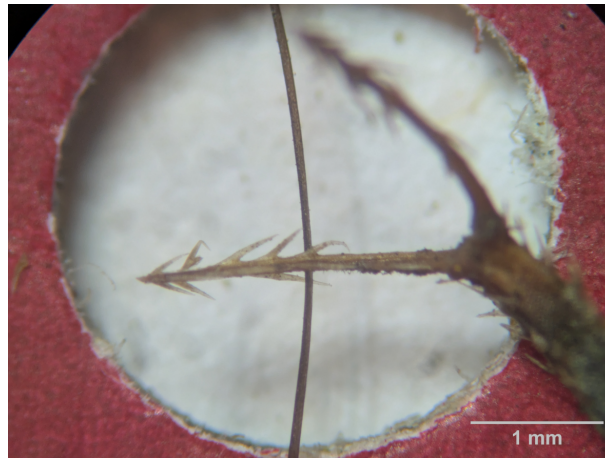


圖 4. 單點毛髮交連裝置。(本圖由作者拍攝)

二、 倒刺建模

因為倒刺一端固定、一端自由，本研究將倒刺簡化如同一根固定在牆壁上的桿子，研究其在受力彎曲時的理論極限值。並依據倒刺在芒的位置，區分為「先端」與「基部」兩組獨立測量，以探討不同位置之差異。

(一) 倒刺的幾何力學模型

根據歐拉-白努利樑理論，基部最大彎曲應力 σ 定義為：

$$\sigma = \frac{6FL \sin \theta}{wt^2} \quad (2)$$

其中 θ 為角度， L 為長度， w 為寬度， t 為厚度。公式中的厚度 t 是二次方，代表厚度對強度的影響遠大於寬度。

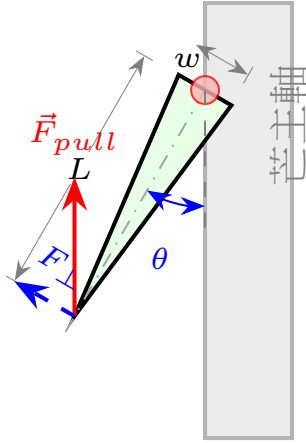


圖 5. 本研究提出之倒刺力學簡化模型。將倒刺視為懸臂樑結構，藉此定義幾何參數與受力方向。圖中定義了夾角 θ 與造成彎曲失效的徑向分力 F_{\perp} 。紅色箭頭代表外加之拔除力 \vec{F}_{pull} ，藍色虛線為其有效折彎分力 F_{\perp} 。基部的紅圈標示了理論上應力最集中的位置。(本圖由作者繪製)

(二) 力學特徵指標計算

本研究中之材料參數設定 ($E = 10 \text{ GPa}$, $\sigma_y = 30 \text{ MPa}$) 是參照 Niklas (與 Gibson (對植物木質化組織之典型定義。

- **屈服強度 ($\sigma_y = 30 \text{ MPa}$)**：根據植物細胞壁之極限強度數據，木質化組織之屈服強度通常介於 20 至 50 MPa。本研究採取保守估計值 30 MPa，作為界定倒刺結構產生不可逆形變 (進入失效階段) 的臨界點。
- **楊氏模量 ($E = 10 \text{ GPa}$)**：乾燥植物纖維 (如麥芒、木質部纖維) 之彈性模量多介於 5 至 20 GPa。本研究取 10 GPa，用以模擬倒刺受力初期之彈性階段。

以上述材料參數以及影像分析所得數據，代入以下力學公式進行運算，量化倒刺之理論結構效能：

- **臨界折彎力 (Yield Force, F_{yield})**：當作用力超過此數值時，倒刺將發生永久性損毀 (類似紙張折彎現象)。計算公式如下：

$$F_{yield} = \frac{\sigma_y w t^2}{6L \sin \theta} \quad (3)$$

其中：

- σ_y ：材料的屈服強度 (Yield Strength)，本研究設定為 30 MPa。
- w 與 t ：分別為倒刺基部的寬度與代表性厚度。
- L ：倒刺的功能長度。
- θ ：倒刺相對於芒主軸的夾角。
- **抗挫曲能力 (Critical Buckling Load, P_{cr})**：用於評估倒刺在「穿刺過程」中抵抗軸向失穩的能力。根據歐拉公式，對於一端固定、一端自由的懸臂結構，其公

式為：

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2} \quad (4)$$

其中：

- E ：材料的楊氏模量 (Young's Modulus)，本研究設定為 10 GPa。
- I ：截面慣性矩 (Moment of Inertia)，對於矩形截面其值為 $I = \frac{wt^3}{12}$ 。
- L ：懸臂之有效長度。

(三) 模型行為分析與幾何敏感度

為了進一步評估結構設計本身對應力分配的影響，本研究定義 **幾何脆弱指標 K** (Geometric Vulnerability Index)。透過將力學項與幾何項分離，可量化倒刺結構將外力轉化為基部應力的效率。

由公式 3 可推導出應力 σ 與外力 F 之關係：

$$\sigma = F \cdot K, \quad \text{其中} \quad K = \frac{6L \sin \theta}{wt^2} \quad (5)$$

幾何脆弱指標 K 是倒刺的「弱點分數」。 K 值越大，代表這個形狀越容易把外力轉化為破壞性的應力，其代表以下物理特徵，可作為後續數據分析之理論基礎：

- **厚度敏感性**：應力與代表性厚度 t 呈平方級負相關。這說明微小的發育差異（厚度縮減）會造成應力大幅上升，這也預測了實驗中觀察到的「基部損毀」現象。
- **長度與細長比的權衡**：公式顯示高細長比 (AR) 就像細冰棒棍，雖然能增加接觸機會，但其 K 值提升，導致結構在力學上變得脆弱。反之，短而粗的刺 K 值低，結構就更堅固。
- **角度動態失效**：當倒刺受力張開導致角度 θ 增大時，應力隨 $\sin \theta$ 函數迅速攀升，當局部應力超過屈服強度 $\sigma_y = 30 \text{ MPa}$ 時，基部即產生斷裂，最終導致脫鉤。

(四) 數據統計處理流程

所有力學數據均透過 R 語言進行統計檢定：

- **前提檢定**：採用 Shapiro-Wilk 檢定確認數據是否符合常態分佈。
- **差異性檢定**：常態分佈數據採用 Welch Two Sample t-test；非常態分佈數據則切換至 Wilcoxon rank sum test。
- **數據清洗**：利用 IQR 方法偵測並標註實驗中的離群值。

(五) 單一倒刺的臨界折彎力測量

本研究利用自製之「懸臂式微力感測器」進行實測。實驗時將瘦果倒刺勾掛於感測樑末端之微型環圈，拉動瘦果使倒刺逐漸外張（即圖 5 之 θ 增加）。持續施力直至倒刺基部發生塑性折損，導致倒刺與感測樑脫鉤；此瞬間紀錄之感測樑撓度，經由感測樑之彈性係數 k 換算後，即為該倒刺之實測臨界折彎力 (F_{yield})。

(六) 生物力學幾何建模與應力分析工具

由於倒刺結構極其微小且形狀不規則，傳統手工計算難以精確模擬其應力分佈。為此，本研究開發一套基於 P5.js 的互動式分析工具，將顯微影像轉化為數位力學模型，用以預測倒刺失效的「弱點」位置。

- ① **邊緣擬合與幾何重建**：透過工具將倒刺顯微影像以控制點擬合其邊緣為連續的貝茲曲線，動態擷取沿主軸 x 分佈之局部寬度 $w(x)$ 。
- ② **核心力學邏輯與修正權重模型**：本工具核心演算法基於歐拉-白努利樑理論 (Euler-Bernoulli Beam Theory)，但針對生物真實構造進行修正。程式採用以下應力加權公式：

$$\sigma(x) \propto \frac{M(x)}{w(x)^2} \cdot f(\epsilon) \quad (6)$$

本模型特別選擇以 $w(x)^{-2}$ 作為抗性權重。

- **原因**：理想物理模型通常假設尖端會縮減至零，但實際觀察發現倒刺尖端仍維持一定的基礎厚度，因此進行修正，修正後能更穩健地模擬結構在受力時，應力如何由尖端傳遞，並預測應力峰值（紅色熱點）位移至倒刺中段的現象。
- ③ **最大應力點預測**：工具會自動計算沿主軸 x 分佈之局部寬度 $w(x)$ ，並標記出最大應力點（圖 6 中的紅色圓圈）。由倒刺的形狀分析，可發現最大應力點並非出現在最底部的基部，而是向外偏移至倒刺中段。

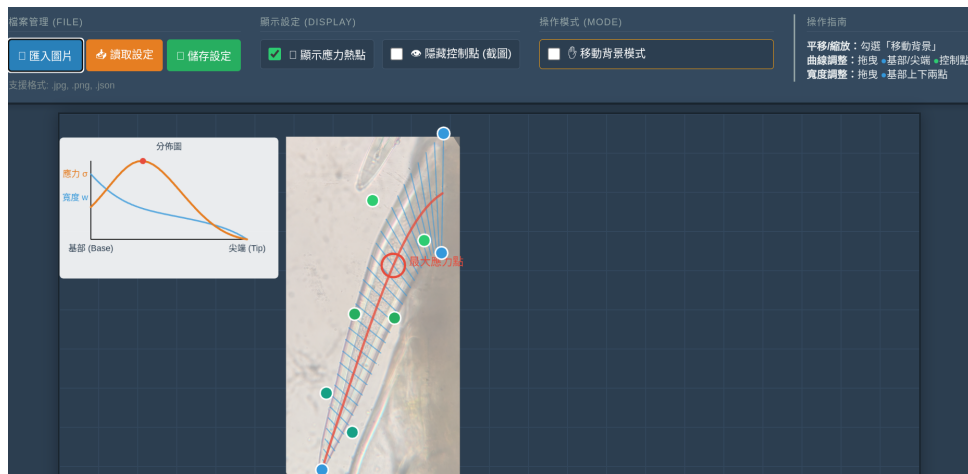


圖 6. 生物力學視覺化工具：標示出應力最高峰（機械保險絲預期位置）。

三、 倒刺結構群量化指標

為評估單一瘦果上的倒刺結構群之效能與損耗，且確保確保各階段數據之可比性，本研究定義以下指標：

1. **有效倒刺留存率 (Barb Retention Rate, BRR)**：有效倒刺留存率定義為實驗前後功能性倒刺數量的百分比變化，其計算公式如下：

$$BRR = \frac{N_{\text{final}}}{N_{\text{initial}}} \times 100\% \quad (7)$$

其中：

- N_{initial} ：表示實驗前單一瘦果之倒刺總數。
- N_{final} ：表示實驗後仍具備功能性（未斷裂或嚴重磨損）之倒刺總數。

2. **功能性判定標準** 基於顯微觀察的結果，倒刺失效包含「物理脫落」與「結構失穩」。凡發生以下現象者，均不計入 N_{final} ：

- **幾何挫屈 (Buckling)**：倒刺細胞壁出現明顯摺痕或摺疊點。
- **永久變形**：因外力導致角度改變且無法恢復，失去鉤掛效能者。
- **物理斷裂**：倒刺完全脫離或部分殘缺。

3. **承重-有效倒刺比 (Load-to-Effective-Barb Ratio, LEBR)** 為評估單一細胞結構在脫離瞬間平均分擔的最大力值，用以評估單一細胞結構的力學貢獻度，定義「承重-有效倒刺比」如下：

$$LEBR = \frac{F_{\text{max}}}{N_{\text{final}}} \quad (\text{gw}/\text{barb}) \quad (8)$$

其中：

- F_{max} ：代表瘦果脫離附著物瞬間所測得之最大力值（Maximum Pulling Force）。
- N_{final} ：承接前述公式 (7)，為實驗後具備功能性之倒刺總數。

4. **結構留存率 (Retention Rate, η)** 用於循環實驗中，表示第 n 次衝擊後相對於初始狀態之完整度。

四、 靜態拉拔

本階段旨在建立瘦果在不同嵌入深度（1.5 mm 至 2.5 mm）下之基礎附著數據。採用電子秤紀錄脫落力，並透過重複測試觀測同一樣本之附著力衰退現象。

(一) 實驗流程

- ① **樣本製備**：將瘦果黏貼於卡紙，露出 5 mm 倒刺區，安裝於顯微鏡升降台。
- ② **接觸設定**：透過顯微鏡調節輪，將瘦果下壓至當次測試設定的深度。
- ③ **拉拔測試**：緩慢提升顯微鏡，記錄電子秤的最大讀數差值（脫落力）。
- ④ **重複測試**：同一樣本進行兩次測試，記錄兩次承重重量。
- ⑤ **顯微觀察**：拍攝實驗前後的倒刺影像。

五、 動態模擬

本研究透過控制 Arduino 伺服馬達系統（圖 3）產生 0.8 ~ 5.0 Hz 之往復擺動頻率，模擬自然環境中，模擬宿主不同強度的慣性衝擊，並利用生存分析量化留存時間。

（一） 實驗設計

本研究採用「二因子交叉設計」：

- **操縱變因一：介質種類**

包含狼毫、尼龍及棉線。狼毫與尼龍以筆刷形式呈現；棉線則固定於長度一致之竹筷上。

- **操縱變因二：震動頻率**

設定四種代表性頻率：0.8 Hz（模擬行走）、2.5 Hz（模擬慢跑）、5 Hz（模擬快跑）。

（二） 實驗流程

本實驗採標準化掛載與擺盪測試，具體步驟如下：

- ① **標準化附著程序**：將瘦果置於電子秤基準面，由實驗者操作介質垂直下壓於瘦果先端之刺芒。透過電子秤即時監控，精確施加 30 g 之正向壓力並持續 1 秒，隨後垂直釋放，確保瘦果自然且均勻地附著於介質纖維中。
- ② **動態測試配置**：將附著瘦果之介質固定於伺服馬達擺臂，並校準轉動中心至瘦果質心之有效力臂長度 $L = 15 \text{ cm}$ 。
- ③ **數據採集與觀測**：啟動 Arduino 驅動程式以預設頻率進行擺盪並同步計時。記錄瘦果自介質脫離之瞬時時間；若測試達 60 s 上限仍未脫離則終止該次實驗。每組「介質 × 頻率」條件均重複測試 5 次 ($N = 5$)，以利後續統計分析。

（三） 物理模型分析

伺服馬達之往復運動可視為簡諧運動，為將頻率 (Hz) 轉換為具生物意義之加速度強度 (G-force)，採用位移對時間之二階導函數。其位移公式定義為：

$$x(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (9)$$

對時間求二階導數可得最大加速度 (a_{max})：

$$a_{max} = A \cdot (2\pi f)^2 = L \cdot \theta_{rad} \cdot (2\pi f)^2 \quad (10)$$

其中， A 為最大位移振幅， L 為力臂長度 (0.15 m)， θ_{rad} 為擺動弧度。

(四) 系統實測加速度校準分析

由於馬達轉矩 (Torque) 於長力臂下的物理限制，實際擺幅可能與程式設定存在誤差，故採用影像與聲音分析進行驗證：

- **影像分析 (實際振幅)**：錄製高速影片並匯入 ImageJ。利用 *Stack* 功能進行 *Z-projection* (最大強度疊合)，測量運動路徑之幾何長度以求得實際最大振幅。
- **聲音分析 (實際頻率)**：利用 *FFmpeg* 提取音軌並匯入 *Audacity*。透過觀察聲波圖中往復運動之週期性特徵，精確計算實際運行頻率。

實驗設定力臂長度 $L = 0.15\text{ m}$ ，實測數據與換算之加速度校準結果如表 1 所示：

表 1. 動態模擬系統加速度校準數據表

設定頻率 (Hz)	10 次半週期耗時 (s)	實際頻率 f (Hz)	實際單邊振幅 θ ($^{\circ}$)	最大加速度 a_{max} (m/s^2)	慣性負荷 (G)
0.8	6.141	0.814	27.41	1.88	0.19
2.5	1.808	2.765	28.19	22.28	2.27
5.0	0.971	5.149	26.01	71.28	7.27

校準結果顯示，系統在 5.0 Hz 負載下能產生高達 7.27 g 之慣性加速度。此強度已超越多數哺乳類動物奔跑時之體表加速度，足以模擬自然界中極端之動態傳播受力情境。此外，觀察發現當設定頻率增加時，馬達因負載限制導致實際擺幅 (θ) 略微收縮，但實際運行頻率 (f) 最終確保了系統能覆蓋從行走 (0.19 g) 至快跑 (7.27 g) 之運動過程。

六、 衝擊實驗

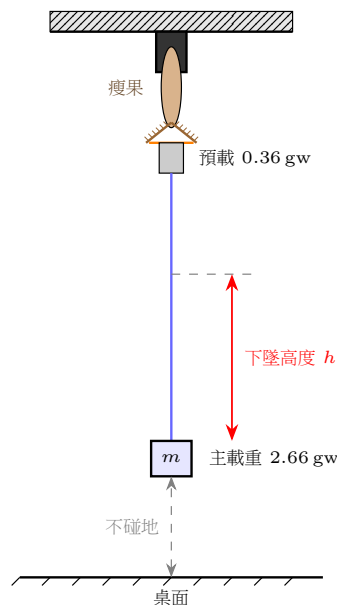


圖 7. 衝擊實驗系統示意圖。顯示瘦果固定位置、下墜高度 h 以及重力位能傳遞路徑。(本圖由作者繪製)

本階段探討衝擊實驗對大花咸豐草瘦果微觀結構造成的破壞力。本研究目的在量化不同脫離能量影響倒刺的結構完整度。見圖 7 所示，設定重物由不同下墜高度（4 cm, 7 cm, 10 cm）傳遞衝擊能到瘦果的倒刺，並進行循環測試 ($n = 3$)。

(一) 損傷模型假說

為分析倒刺受損規律，本研究建立以下三種損傷模型假說進行驗證：

- 脆性失效模型：倒刺在首次大衝量下即發生大規模斷裂（約 80%），後續循環損耗極小。
- 累積疲勞模型：單次衝量產生微觀裂縫，損傷率隨循環次數 n 增加而呈現加速上升趨勢。
- 韌性保護模型：倒刺具備結構彈性，能耐受多次中等衝量而不顯著受損，直至達到臨界次數後發生驟崩。

(二) 實驗流程

本研究透過載荷系統模擬動物移動時的反覆拉扯，流程分為預載、施測與終止判斷三部分：

1. **預載與標準化** 為確保倒刺受力點一致，利用 30 cm 魚線連接兩端迴紋針，並以 0.36 g 棉線與迴紋針作為預載系統。掛載時須確保瘦果雙芒穩定支撐重量，使倒刺與纖維達成緊繃受力之相同物理起點。

2. **循環負載測試** 以 2.66 g 螺帽作為主載重，並根據預實驗結果，設定三組下墜高度 h （4 cm、7 cm 與 10 cm）。

- **垂直校正**：使用長尾夾確保固定端與釋放點位於同一垂直軸線，避免擺盪產生受力分散之誤差。
- **介質維護**：每一輪衝擊後移動棉線至全新區段，藉此排除介質疲勞變因，確保摩擦特性的一致性。

測試持續進行至完成固定次數 $n = 3$ ，或有效倒刺留存率 $< 50\%$ ，則終止實驗並記錄數據

(三) 物理模型分析

本實驗以重力位能作為主要能量指標，用以量化不同脫離能量下之倒刺結構損耗。實驗以能量（mJ）作為定量基準，其物理破壞源於動量劇烈變化所產生的瞬時力，相關物理量與邏輯如下：

- **能量輸入**：以重力位能 $E_p = mgh$ 作為定量指標。其代表瘦果在強迫脫離過程中，施加在倒刺的總能量。
- **動量變化**：重物下墜距離 h 瞬間之末速度為 $v = \sqrt{2gh}$ 。於魚線拉直瞬間，動量於極短時間 Δt 內歸零，產生衝量 $J = \Delta p = m\sqrt{2gh}$ 。

- **破壞機制**：根據衝量定理，碰撞產生的衝擊力 $F = J/\Delta t$ 。本實驗選用剛性尼龍魚線以極小化 Δt ，將輸入之位能有效轉化為極高之瞬時力，模擬真實環境中瞬間拔除導致的結構脆性斷裂。由於碰撞時間 Δt 難以於微觀尺度下直接監測，因此本實驗採用位能 (mJ) 作為分析基礎。

(四) 衝擊能量換算實例與參數設定

本研究之衝擊能量計算係以主載重螺帽之重力位能為基準。設定重力加速度 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ ，主載重質量 $m = 2.66 \text{ g}$ (0.00266 kg)。以 4 公分的實驗高度能量換算如下：
高度 4 cm (0.04 m)：

$$E_{p1} = mgh = 0.00266 \times 9.80 \times 0.04 \approx 0.001043 \text{ J} = 1.043 \text{ mJ}$$

註：計算中未計入預載系統 (0.36 g) 之質量，因其於衝擊發生前已處於靜止平衡狀態，不貢獻下墜過程之動能增量。

七、 環境濕度

本研究採用 2×2 因子實驗設計 (見表 2)，透過對瘦果與介質進行潮濕 (浸水 5s) 與乾燥處理，檢驗水分對附著力與倒刺韌性之交互影響。總樣本數 $N = 40$ ，每組均使用全新樣本以模擬真實降雨情境。

表 2. 濕度實驗分組設計

瘦果狀態	介質狀態	研究功能	瘦果狀態	介質狀態	研究功能
乾燥	乾燥	基準組	乾燥	潮濕	驗證宿主物理變化
潮濕	乾燥	驗證倒刺軟化效應	潮濕	潮濕	模擬真實降雨情境

為模擬降雨情境，潮濕處理組將樣本浸入過濾水中 5s 確保液態水接觸倒刺或介質表面，並靜置 2 min 使水分充分作用；乾燥組則不進行任何處理。完成水合處理後，立即將單顆瘦果以固定入深 (1.75 mm) 嵌入介質中。後續測試程序與「靜態拉拔」實驗相同，同步紀錄最大承重力與實驗前後之有效倒刺數量變化。

八、 生物介入

由實驗者模擬手指撥除動作，記錄脫離瞬間之峰值力。此數據將作為「主動介入」之基準，與動態實驗之慣性力進行數量級對比。

將單顆瘦果以標準壓力 (30 gw) 與深度 (1.75 mm) 壓入固定於電子秤之棉線中，確保倒刺與纖維達成穩定鎖定。由實驗者以手指捏住瘦果基部，沿垂直方向快速拔除，即時記錄電子秤測得之最大負向力，隨後於顯微鏡下統計殘存倒刺數量以觀察結構損傷。

九、 萌發表現

為驗證力學脫離過程中造成的結構損傷是否影響發芽或幼苗生長，本階段實驗探討瘦果在受損後，面對不同環境時的發芽與存活狀況。

(一) 實驗因子與樣本配置

本研究採用 2×2 雙因子設計（處理方式 \times 試驗環境），分為「去芒」與「未去芒」兩類處理，並配置於兩種萌發環境中。

① 實驗一：紙巾萌發試驗 (Exp 1)

採用長 16 cm 寬 11 cm 之塑膠盤，盤底鋪設兩層潤濕之紙巾。共計 4 個重複盤，每盤放置 30 顆瘦果（15 顆去芒、15 顆未去芒）。為消除盤內位置效應，種子採隨機方位配置。總樣本數為 $N = 120$ 。

② 實驗二：穴盤覆土出苗試驗 (Exp 2)

採用長 17.5 cm 寬 13.5 cm 的 12 穴育苗盆，共計 4 個重複盆。每穴放置 4 顆瘦果，均勻配置於穴位之四個角隅方位，以避免空間競爭干擾。每個育苗盆隨機配置 6 穴去芒組與 6 穴未去芒組。總樣本數為 $N = 192$ 。

(二) 標準化操作流程

為確保各組間物理阻力之一致性，本研究訂定標準化操作規範：

- ① **微觀損傷模擬**：利用精細剪刀將芒完全除去，模擬瘦果從宿主強行脫離後之極限失效狀態。
- ② **覆土精確控制**：實驗二使用市售細土作為介質。將種子置於底土後，覆蓋 1.0cm 之均一土層。採用「自然鋪平、不加壓實」原則，確保物理阻力之標準化。

透過萌發影像監測系統，設定每 5 分鐘自動拍攝影像乙張。實驗後的影像數據經由人工判讀結合時間戳記轉換為時間序列數據，並依據下述公式與生存分析模型進行後續運算，以評估去芒處理對其生存代價之影響。

十、 數據處理與統計分析

本研究之數據分析流程旨在將微觀觀測與力學實測轉化為具備統計顯著性之生物力學模型。所有量測數據均以 R 語言環境進行統計運算。

(一) 統計方法與模型驗證

- **型態與力學指標之差異檢定**：針對先端與基部倒刺之幾何參數 (L, w, t) 及推算力學指標 (F_{yield}, P_{cr})，採用**獨立樣本 t 檢定 (Independent t-test)** 分析其空間分佈之顯著性差異。

- **感測系統之線性標定**：利用**線性迴歸 (Linear Regression)** 建立撓度與作用力之轉換模型，並透過**殘差分析 (Residual Analysis)** 檢驗模型之線性度與變異數齊一性。
- **動態附著力與萌發動力學之生存分析**：
 - 針對附著實驗，繪製存續曲線並以「中位數掉落時間」量化附著穩定性。
 - 針對萌發實驗，利用 **Kaplan-Meier** 估計法建立發芽與出土動力學曲線，並透過 **Log-rank Test** 檢定不同處理組間曲線分布之顯著性差異。
 - 針對觀測期內未發生事件之樣本（如 60 秒未脫落或實驗結束未發芽者），依統計規範視為「截尾數據 (Censored Data)」處理。
- **萌芽與出土的量化與公式**：為描述瘦果克服環境阻力之能力，計算以下指標，量化發芽或出土的狀況，以下已萌芽為例，亦可替換為出土：
 - **累積萌芽率 (Germination Percentage, GP)**： $GP = (N_g/N) \times 100\%$ 。用於呈現各組別最終的萌發率。
 - **平均萌芽時間 (Mean Germination Time, MGT)**： $MGT = \sum(D \cdot n) / \sum n$ ，其中 D 為天數， n 為該日成功數。萌芽或出土的平均天數，數值越小代表該組別越能快速發芽或出土。
 - **萌發速率指數 (Germination Rate Index, GRI)**： $GRI = \sum(G_i/D_i)$ ，反映每日萌發率之累加動能。其中 G_i 為第 i 天的發芽百分比（當天發芽數/ $N \times 100$ ）， D_i 為實驗開始後的總天數。此指標對早期萌發賦予較高權重，數值越高代表具備越強的爆發力與環境競爭優勢。
 - **萌芽的速度變異係數 (Coefficient of Velocity of Germination, CVG)**： $CVG = 100/MGT$ 。此指標將 MGT 轉換為速率單位。當瘦果於實驗初期萌發時，CVG 趨近於 100（理論最大值）；隨萌發時間延遲，CVG 數值下降。該指標排除最終發芽率的干擾，純粹用於比較不同處理組間「已萌發個體」的萌發動能。
- **多因子變異數分析 (Two-way ANOVA)**：應用於濕度實驗，檢驗「瘦果水合狀態」與「介質物理特性」對附著力之主效應與交互作用，顯著時進行 **Tukey HSD** 事後檢定。
- **物理模型擬合與損傷預測**：利用線性回歸建立「累積衝擊能量」與「倒刺結構損傷率」之關聯，並結合「錐形懸臂樑模型」進行應力分析，驗證機械保險絲假說。

肆、結果與討論

一、倒刺之型態發育與幾何特徵

顯微觀察顯示，瘦果頂端之芒是由花萼發育而成，其表面倒刺為單細胞毛狀體，在芒的內外側皆有分佈（圖 8）。統計分析指出，先端與基部倒刺在絕對尺寸上具備極

顯著差異，但在幾何比例（細長比 $AR \approx 1.9$ ）上展現高度一致性（見表 3）。



圖 8. 大花咸豐草芒的發育與倒刺細胞的微觀結構。(本圖由作者拍攝)

表 3. 先端與基部倒刺之幾何型態與力學指標統計摘要

項目指標	先端 (Tip)	基部 (Base)	顯著性 (p-value)
幾何型態參數 (影像分析)			
倒刺長度 (L) [μm]	157.75 ± 40.80	510.75 ± 112.24	0.005 (**)
倒刺寬度 (w) [μm]	81.00 ± 24.70	270.25 ± 56.97	0.003 (**)
倒刺厚度 (t) [μm]	35.50 ± 20.07	39.75 ± 6.08	0.709
張開角度 (θ) [$^\circ$]	29.61 ± 9.08	34.48 ± 15.24	0.607
細長比 (AR)	1.97 ± 0.15	1.89 ± 0.12	0.439
理論力學功能參數 (建模計算)			
臨界折彎力 (F_{yield}) [mN]	7.43 ± 6.50	9.68 ± 6.45	0.640
抗挫曲能力 (P_{cr}) [mN]	502.94 ± 659.08	158.31 ± 100.66	0.374
幾何脆弱指標 (K)	$(8.54 \pm 8.90) \times 10^9$	$(4.54 \pm 2.93) \times 10^9$	0.445

注： $n = 10$ ；數據以「均值 \pm 標準差」表示。(**) 表示 $p < 0.01$ ，顯示極顯著差異。

(一) 結構一致性

雖然基部倒刺顯著大於先端，但兩者 AR 與理論 F_{yield} 均無顯著差異，說明倒刺寬度的增加（提升強度）與長度的增長（增加力臂）在物理公式中產生了抵銷效應，使得倒刺在不同位置上，面對脫鉤力時均具備相近的韌性門檻。

(二) 導角保護機制

此外，觀察發現倒刺與主軸連接處具備顯著的導角構造。此構造在力學上能減少應力集中，更在刺入階段扮演了「幾何擋塊」角色，使倒刺即便受壓向主軸靠攏，也能維持穩定的工作夾角，不致因過度縮合而喪失勾掛效能。

二、感測系統驗證與倒刺材料屬性之物理定義

(一) 感測系統驗證

本研究之「懸臂式微力感測器」經校正具備高線性度 ($R^2 > 0.99$, 圖 9), 且殘差絕對值均維持在 10^{-3} g 數量級, 對於量測毫牛頓等級的倒刺受力而言, 其系統誤差在可接受範圍內。利用此系統實測, 單一倒刺之臨界撓度為 $\delta \in [0.7, 2.0]$ cm, 換算可得開始屈服之臨界力 F_{exp} 約為 0.31 ~ 0.88 mN。

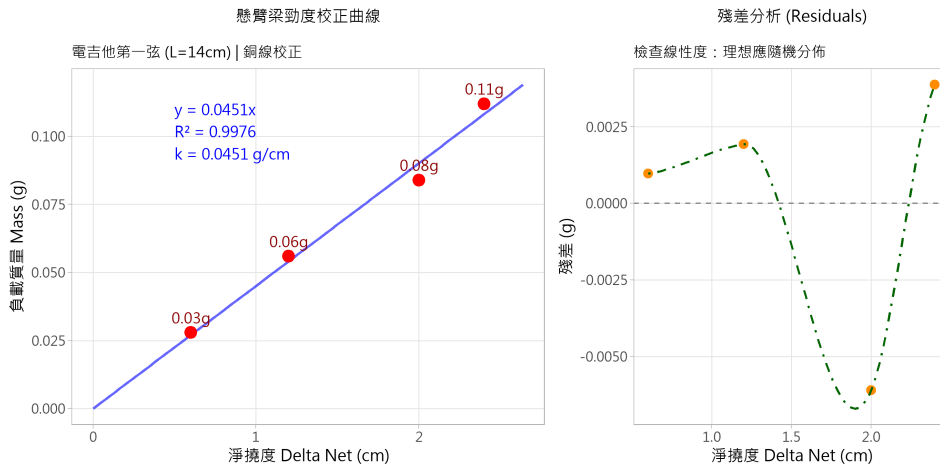


圖 9. (A) 懸臂式微力感測器的勁度校正曲線；(B) 殘差分析圖。結果顯示系統具備高精確度的線性轉換特徵。(本圖由作者繪製)

(二) 材料屈服強度之修正

將實測值代入懸臂樑模型反算, 求得倒刺之真實屈服強度 $\sigma_y \approx 1.4 \sim 3.6$ MPa, 顯著低於乾燥纖維文獻值 (30 MPa), 這說明倒刺具備高韌性與低剛性, 能以「塑性折彎」吸收能量。即便強度較低, 重新計算之抗挫曲能力 P_{cr} (15 ~ 50 mN) 仍高於折彎力數十倍。

三、 附著機制之物理本質：力學非對稱性與機械保險絲

本研究發現倒刺具備顯著的「力學非對稱性」, 這源於軸向與徑向受力下失效模式的量級差異。根據表 3 之理論模擬, 先端倒刺之軸向抗挫曲能力 ($P_{cr} \approx 502.9$ mN) 較其徑向臨界折彎力 ($F_{yield} \approx 7.4$ mN) 高出約 68 倍。這種量級差異確保了倒刺在刺入宿主 (受壓) 時能維持高剛性之幾何穩定性, 而在脫離勾掛 (受彎) 時則能透過適度的塑性屈服來吸收脫鉤能量。

(一) 單一倒刺之多階層失效型態與機械保險絲機制

透過「單點毛髮交連裝置」的動態觀察發現, 單一倒刺在拔除過程中的失效並非單一型態, 而是呈現出受載荷強度影響的多階層失效過程 (圖 10)。根據顯微分析, 失效模式可歸納為以下四類：

- ① **先端塑性變形**：發生於輕微勾掛時，倒刺尖端因直徑極小而優先屈服，起到初步的能量耗散作用。
- ② **中段與 1/3 處之塑性折彎**：這是最常見的失效模式。塑性變形點由基部向外位移，普遍出現於距離基部約 1/3 或中段位置，形成明顯的幾何折損。
- ③ **中段脆性折斷**：當拔除速度較快或受力超過材料極限時，倒刺會在保險絲區域（中段）發生橫向脆性斷裂。
- ④ **基部撕裂與折斷**：僅發生於極端負載或介質深度干涉時，此模式代表「保險絲機制」已達極限，應力直接回傳至芒主體界面。

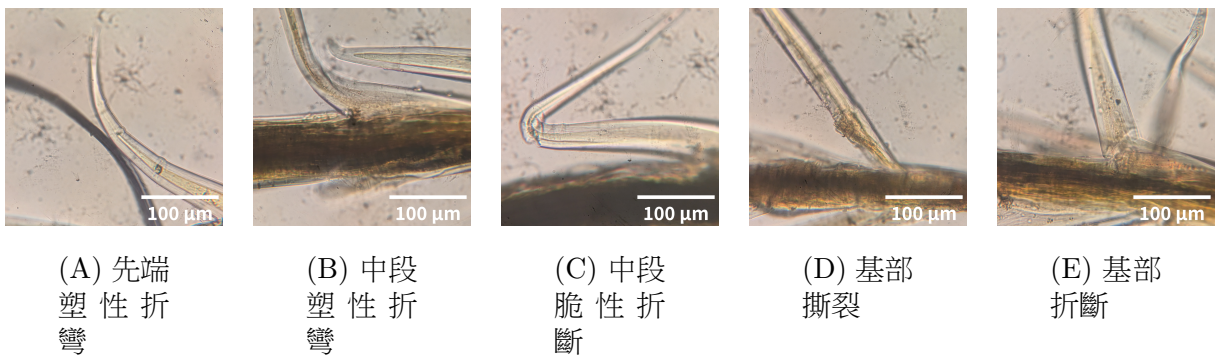


圖 10. 單一倒刺失效型態分析（本圖由作者拍攝）

這些觀察顯示了基礎等截面懸臂樑模型的局限性。等寬度、厚度的模型預測力矩負荷在基部 ($x = 0$) 最大，應力應集中於此導致失效。然而，本研究透過「**錐形懸臂樑 (Tapered Beam) 模型**」進行修正。雖然倒刺基部承受的負荷最強，但其結構自基部向尖端迅速縮減，這代表倒刺「變細、變弱的速度」遠快於「力矩負荷減輕的速度」。透過本研究開發之視覺化分析工具（圖 11）證實：在導入真實倒刺輪廓後，應力最高峰（紅色熱點）會從連接界面（基部）向外偏移至倒刺中段。

這種刻意將「脆弱點」由基部引導至中段的機制，正是大花咸豐草的「**機械保險絲 (Mechanical Fuse)**」策略。這就像是電路中的保險絲，透過結構的「犧牲」來吸收脫離時的強大能量。這種「斷在中段」的階層式失效，能使芒主體不發生斷裂，以確保此構造在損傷後仍具備基本的餘力。

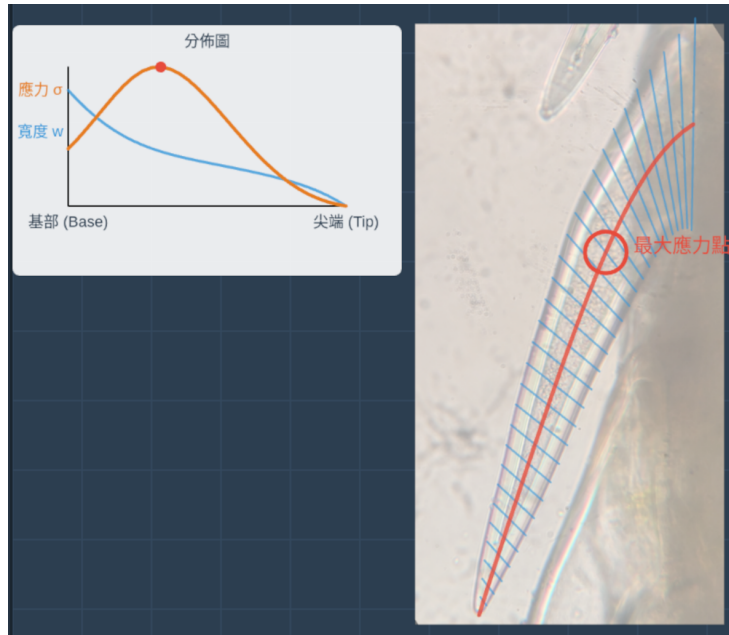


圖 11. 利用視覺化分析工具進行之應力分佈預測。結果顯示應力峰值位於倒刺中段，驗證了形態導向的機械保險絲假說。(本圖由作者繪製)

(二) 失效形態分類與系統性演化策略

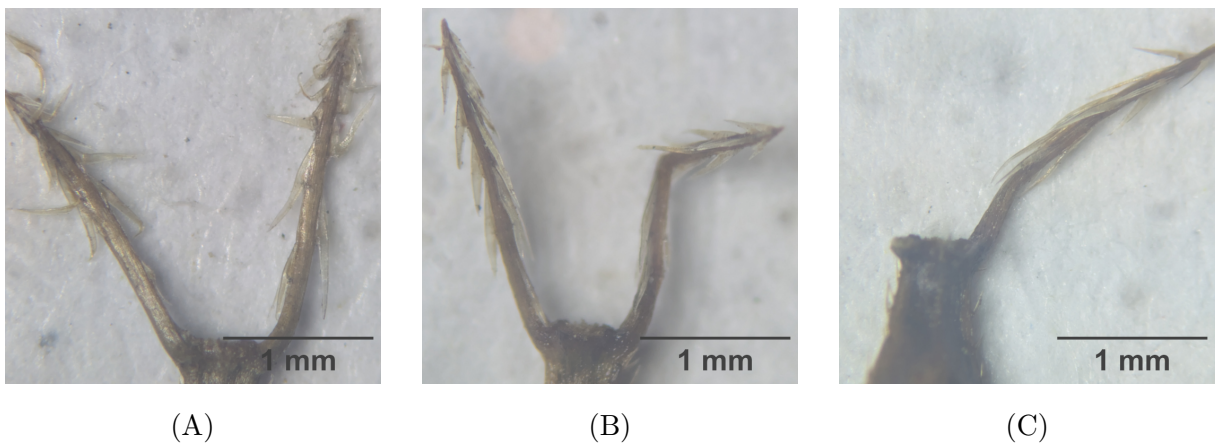


圖 12. 系統性倒刺失效之三種型態。(本圖由作者拍攝)

透過插入棉線再拔除的實驗可觀察到系統性的失效型態，歸納為：(A) 韌性屈服、(B) 結構性挫屈與 (C) 組織斷裂 (圖 12(A)-(C))。實驗發現，宿主毛髮直徑必須與倒刺張角 θ 相匹配方能達成有效勾掛；而發生「韌性屈服」之倒刺在滴水處理後，展現出顯著之吸濕形狀記憶效應。

受損倒刺雖能於數秒內回復幾何外型 (由細胞膨壓支撐)，但二次力學測試顯示其抗彎剛度無法復原，證實水合作用僅能修復幾何外觀，無法修補已微觀破裂的纖維素骨架。此發現從生物力學角度強烈支持了倒刺作為「犧牲性結構」的「單程票傳播」策略：倒刺以不可逆的損傷換取單次成功的附著任務，在保護瘦果主體不受損毀的同時，最大化物種的傳播廣度。

四、 巨觀附着力學驗證與結構損耗統計

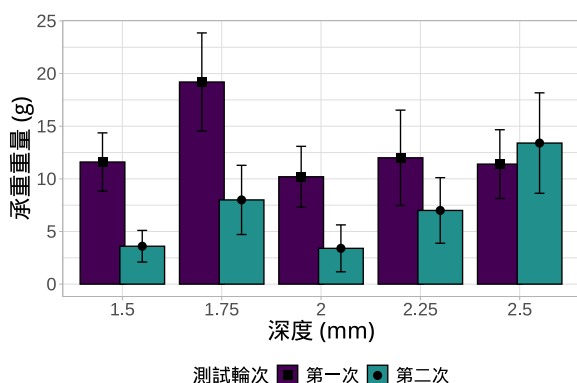


圖 13. 接觸深度對承重能力之影響。(本圖由作者繪製)

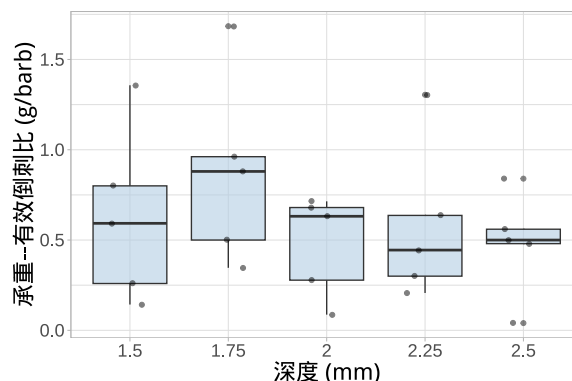


圖 14. 不同深度下之承重-有效倒刺比 (LEBR) 分析。(本圖由作者繪製)

靜態拉拔實驗顯示 1.75 mm 為最佳附著深度，最大承重力達 19.2 gw，此時之「承重-有效倒刺比 (LEBR)」達到峰值 0.87 gw/barb (約 8.53 mN)。(如圖 13與 14 所示)。

本研究採取的瘦果芒長度皆大於 2.0 mm，倒刺主要分佈在從芒尖端算起 1.75 mm 的範圍內，因此當植入深度大於 2.0 mm 時，可能因介質底部密度過大，導致倒刺受壓無法有效展開勾取，或在拉拔初始階段即因應力過於集中而產生局部結構失效，反而降低了整體的負載能力。

(一) 微觀與系統之階層驗證

本研究對比微觀感測數據與靜態拉拔測試結果，發現一顯著之力學階層現象：單一倒刺之起始屈服門檻僅約 0.31 ~ 0.88 mN，然而在系統級的附著測試中，單根倒刺之有效承重 (LEBR) 卻可攀升至 8.53 mN。此量級差異證實了倒刺具備優異的後屈服承載能力，即倒刺在發生微觀塑性變形後，仍能透過組織韌性與纖維間的機械鎖定，提供高出屈服門檻 10 倍以上的緩衝空間，極大地提升了附著穩定性。

成對樣本 t 檢定 ($p < 0.001$, 表 4) 顯示單次附著即伴隨顯著結構損失 (在經歷第單次最大負載後，平均每顆瘦果會損失約 4.4 根倒刺)。

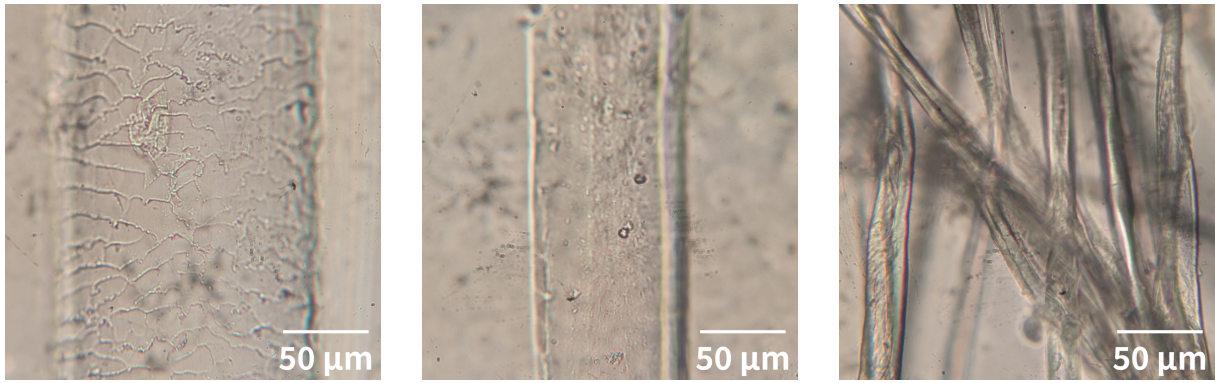
表 4. 倒刺數量變化之成對樣本 t 檢定摘要

檢定項目	樣本數 (df)	t 統計量	p 值	平均差異 (根)	95% 信賴區間
初始 vs. 一測後	24	6.816	4.75×10^{-7}	4.40	[3.07, 5.73]

五、 環境動態響應與生物脫離閾值分析

(一) 動態模擬

為模擬真實環境中宿主運動產生的慣性擾動，本研究針對三種具備不同微觀特徵之介質進行動態模擬 (圖 15)。



(A) 狼毫

(B) 尼龍

(C) 棉線

圖 15. 三種實驗介質之微觀結構與附著界面特徵。(本圖由作者拍攝)

顯微影像與動態存留數據 (圖 16、17) 展現了顯著的相關性：

- **機械連鎖與棘輪效應**：狼毫 (圖 15A) 表面具備顯著的毛鱗片分佈，能與倒刺尖端產生「棘輪效應 (Ratcheting Effect)」，即便在震動下也能限制倒刺沿毛幹滑脫。數據顯示其在低頻震動下具備優異穩定性 (中位數留存時間 60,s)。
- **摩擦力限制與連鎖失效**：相對而言，尼龍介質 (圖 15B) 表面極度平滑且缺乏紋理，無法與倒刺形成機械連鎖。實驗證實單靠純摩擦力不足以對抗動態慣性力，導致其在 5,Hz 高頻下中位數存留時間僅 1 秒，低頻 (0.8,Hz) 亦僅 4 秒。
- **幾何捕捉與三維纏結**：棉線 (圖 15C) 由多股纖維撚製，具備豐富的空間孔隙。倒刺能深陷其中產生三維空間的「機械纏結」，使棉線組在所有頻率 (0.8~5,Hz) 下均能達成 60 秒不脫落的紀錄，證實了多孔隙結構是提升附著廣度的關鍵。

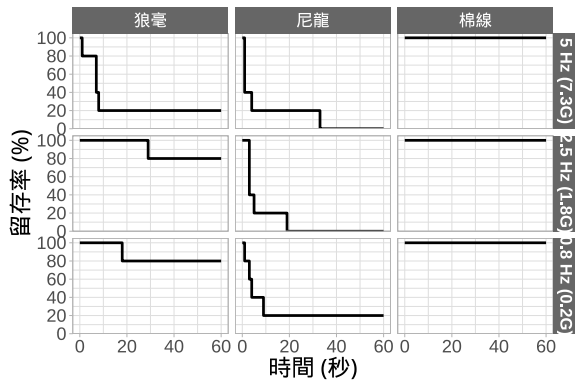


圖 16. 動態震動環境下之瘦果留存生存曲線矩陣。(本圖由作者繪製)

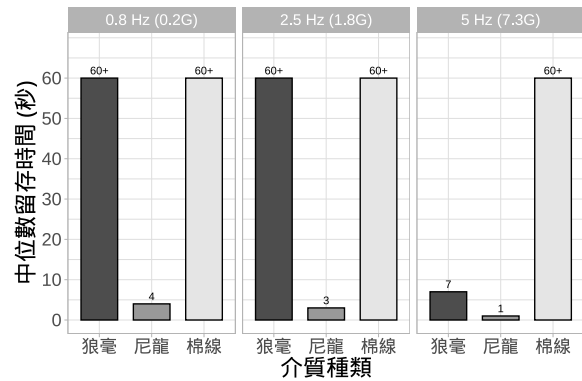


圖 17. 動態實驗條件下之瘦果中位數留存時間。中位數定義：50% 樣本脫落所需時間 (60+ 代表觀察期內未達半數脫落)。(本圖由作者繪製)

本研究進一步量化動態環境下之脫離風險，動態模擬實驗中所產生之最大慣性力，依據牛頓第二定律 $F = ma$ ，質量約 0.01 g 之瘦果在 7.27 g 加速度下產生之慣性力約為：

$$F_{dynamic} = 0.01 \text{ g} \cdot 7.27 \approx 0.0727 \text{ gw}$$

對比靜態拉拔實驗中，瘦果脫離所需之承重力為 $F_{static} \approx 10 \sim 19 \text{ gw}$ ，兩者呈現顯著之量級差異。由此推算瘦果對抗慣性震動之安全係數為：

$$SF = F_{static}/F_{dynamic} \approx 100$$

此極高之安全係數說明，除非遭遇宿主主動清理或極端衝擊，否則日常運動產生的慣性力遠不足以克服倒刺與介質間的幾何鎖定。這從物理層面解釋了為何在大部分介質（除尼龍外）的低頻震動實驗中，樣本存留率皆能維持在 100%，充分驗證了瘦果「易入難出」機制的穩定性。

(二) 衝擊實驗

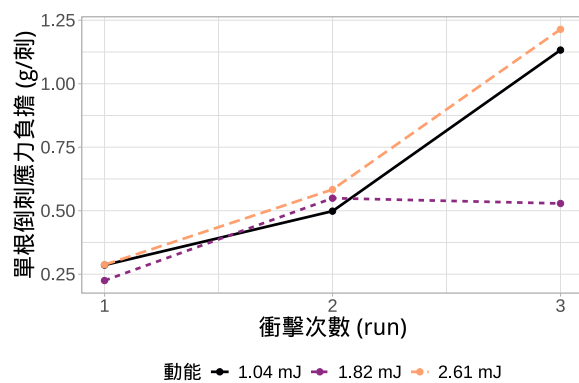


圖 18. 衝擊過程中倖存倒刺之應力負擔變化。(本圖由作者繪製)

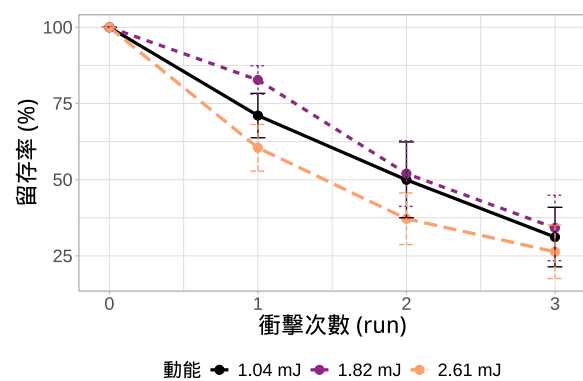


圖 19. 結構衰減曲線：衝擊能量對倒刺留存率變化趨勢。(本圖由作者繪製)

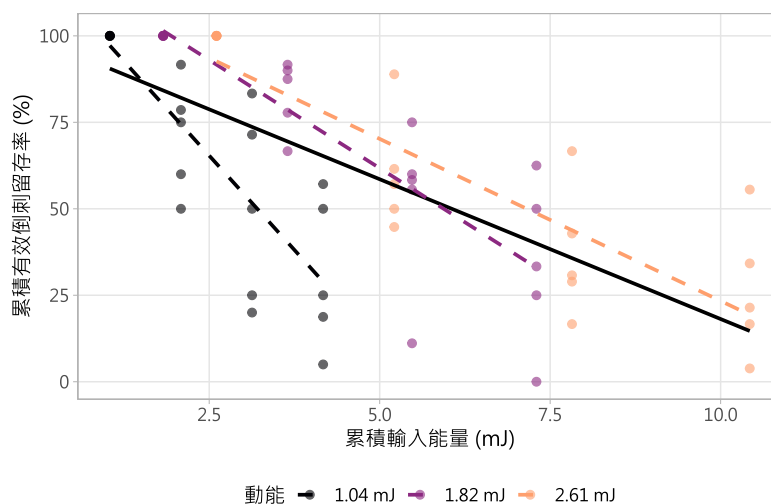


圖 20. 累積輸入能量與累積有效倒刺留存率（BRR）之關聯分析。(本圖由作者繪製)

衝擊實驗則顯示倒刺失效符合「累積疲勞模型」，數據顯示首輪衝擊（1.04 ~ 2.61 mJ）之失效率僅為 29% ~ 39.5%，遠低於「脆性失效模型」預測之 80% 驟崩；

同時，結構在首輪即出現顯著損傷，亦不符合「韌性保護模型」之無損耐受特徵。

倒刺結構具備總能量吸收上限（約 5 ~ 7 mJ，見圖 20），超過後即發生應力轉嫁導致連鎖性損毀（圖 18）。

(三) 濕度調節

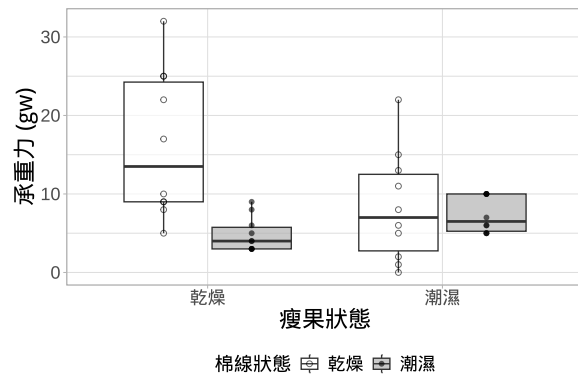


圖 21. 瘦果與介質濕度對附著力之交互影響箱型圖。(本圖由作者繪製)

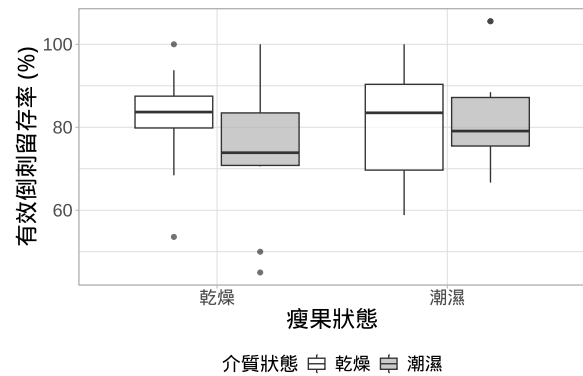


圖 22. 濕度條件對有效倒刺留存率 (BRR) 之影響。(本圖由作者繪製)

表 5. 濕度條件對承重力之二向方差分析摘要表

變異來源	自由度 (<i>Df</i>)	<i>F</i> 統計量	<i>p</i> 值	顯著性
瘦果狀態	1	1.936	0.1726	ns
介質狀態	1	10.428	0.0026	**
交互作用	1	7.599	0.0091	**

濕度實驗（表 5）證實水分会觸發「軟化保護機制」，降低附著力但提升留存率（BRR），避免脆斷。

(四) 生物拔除力

人手拔除力（30.25 gw）與自然慣性力（0.07 gw）呈現千倍落差，定義了生物介入作為「強制終止傳播」的物理門檻。除非受到宿主主動清理或環境劇烈碰撞，否則不會輕易脫離，這再次驗證了咸豐草透過結構損毀換取傳播穩定性的演化代價。

六、 萌發表現

本研究進一步驗證瘦果在傳播過程中的結構損耗（去芒處理），是否會對後續的生物學表現產生負向影響。透過生理潛力（實驗一）與物理阻力（實驗二）的對比分析，探討倒刺結構完整性與環境適應力的關聯。

表 6. 實驗一（紙巾環境）去芒處理對瘦果萌發指標之影響摘要

處理組別	發芽率 (GP) [%]	平均發芽時間 (MGT) [day]	發芽速率指數 (GRI) [%/day]	發芽速度變異係數 (CVG) [%]	T_{50} [hr]
去芒	46.5 ± 35.9	3.37 ± 1.50	17.78	33.66	—
未去芒	49.7 ± 34.4	3.68 ± 0.59	18.10	27.72	154.7

Log-rank 檢定： $\chi^2 = 0.2, p = 0.62$ (ns)；Cox 模型 $p = 0.07$ (.)

註：數據以「平均值 ± 標準差」表示。 T_{50} (hr) 欄位之「—」代表該組別最終發芽率未達 50%，故無法計算中位發芽時間。

表 7. 實驗二（1 cm 覆土）去芒處理對瘦果出土指標之影響摘要

處理組別	出土率 (GP) [%]	平均出土時間 (MGT) [day]	出土速率指數 (GRI) [%/day]	出土速度變異係數 (CVG) [%]	T_{25} [hr]
去芒	26.7 ± 11.6	3.23 ± 0.44	9.32	31.50	113.8
未去芒	34.1 ± 5.4	3.38 ± 0.45	10.55	29.94	92.1

註：數據以「平均值 ± 標準差」表示。

(一) 實驗一：紙巾萌發潛力分析

在紙巾環境下，統計結果顯示「去芒處理」對最終萌發率並無顯著影響。去芒組之平均萌發率為 46.5 ± 35.9%，未去芒組則為 49.7 ± 34.4%（見表 6）。從累積發芽曲線（圖 23）可以觀察到，兩組曲線在整個實驗期間高度重疊，說明在無物理阻力之環境下，芒的移除並未損害瘦果內在的萌發能量。

然而，本實驗觀測到的發芽率顯著低於徐玲明與林訓仕（2005）於 24°C 下測得之 91.5% 以上之表現。此差異可能源於種子採集後的貯藏時間或非定溫實驗環境之影響。在萌發速度方面，未去芒組達到 50% 發芽的時間（ $T_{50} = 154.7$ 小時）與文獻紀錄相近（徐玲明、林訓仕，2005）。觀察發芽速率指數（GRI），兩組數值（17.8 vs 18.1）極為接近，證實完整與損壞之種子在生理萌發狀況接近。

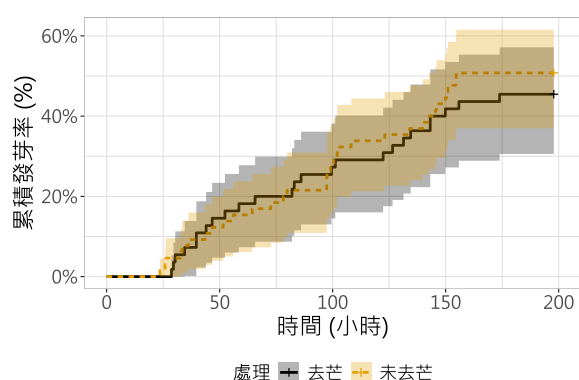


圖 23. 紙巾環境之累積發芽率動力學曲線。陰影區代表 95% 信賴區間，曲線重疊度極高顯示處理效應不顯著。（本圖由作者繪製）

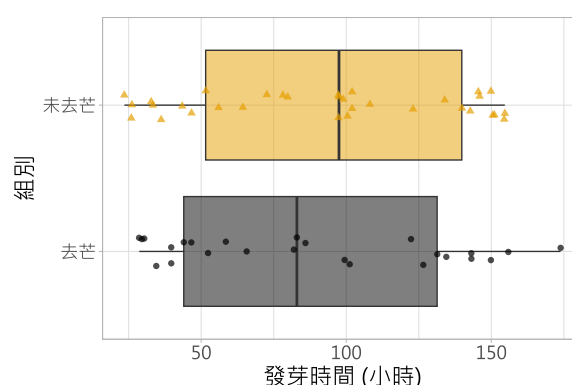


圖 24. 紙巾環境之發芽時間分布圖。（本圖由作者繪製）

(二) 實驗二：克服覆土壓力之出苗表現

當環境壓力提升至 1 cm 覆土深度時，兩組的出苗率皆出現下降（去芒組：26.7%；未去芒組：34.1%）。文獻指出大花咸豐草對覆土具高度耐受性，在 0–5 cm 深度下發芽率仍能維持在 62% 以上（徐玲明、林訓仕，2005）。

然而，本實驗發現當瘦果去芒受損時，其克服 1 cm 覆土的能力出現衰減，去芒組出苗率僅剩 26.7%。值得注意的是，未去芒組達到 25% 出土率的時間（ $T_{25} = 92.1$ 小時）顯著早於去芒組（ $T_{25} = 113.8$ 小時）。這顯示完整的芒結構在土壤中可能扮演了「物理引導」或「空間固定」的角色，有助於瘦果在面對土層壓力時更快速地破土而出。

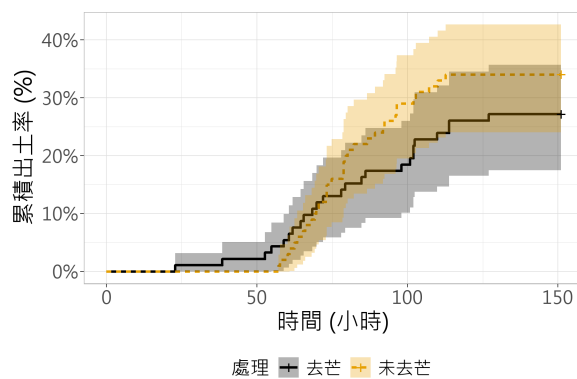


圖 25. 覆土環境之累積發芽率動力學曲線，陰影區代表 95% 信賴區間。（本圖由作者繪製）

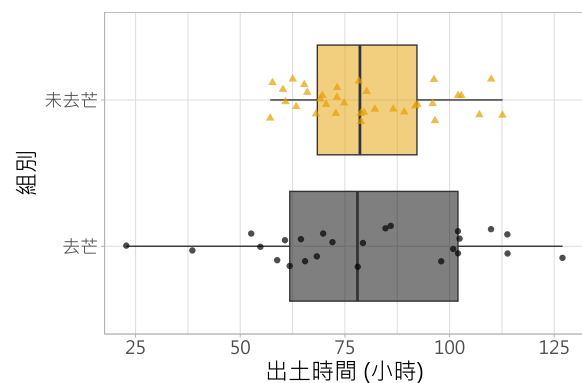


圖 26. 覆土環境下之出土時間分布圖。（本圖由作者繪製）

(三) 環境應力與結構代價之交叉討論

透過交叉分析（圖 27），本研究量化了 1 cm 土層所造成的物理阻力代價。

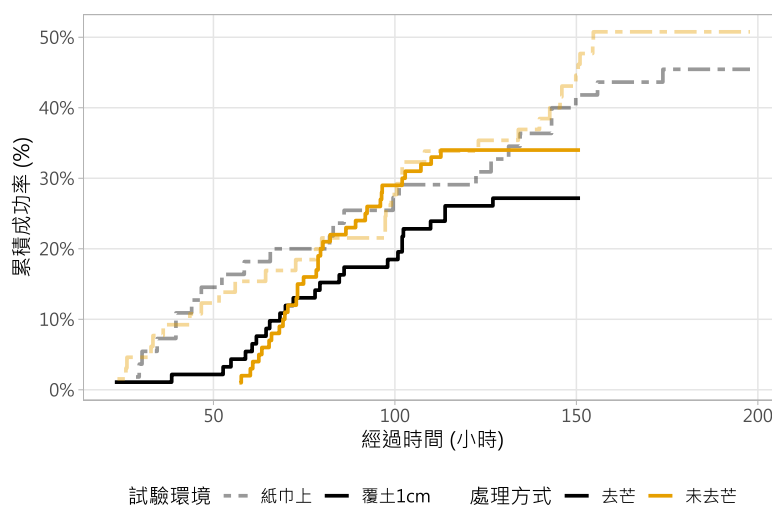


圖 27. 交叉對比曲線：實線代表土壤環境，虛線代表紙巾環境。（本圖由作者繪製）

- **出土折損與環境篩選**：去芒組在覆土下的成功率折損為 19.8%，高於未去芒組的 15.7%。相較於文獻中完整種子在 0 cm 與 1 cm 下極小的發芽落差（約 98% 降至 90%），本實驗證實結構受損會放大環境壓力的篩選效應。
- **結構輔助與克服阻力效率**：本研究透過計算「阻力克服係數」，即覆土組與紙巾組的 CVG 比值 (CVG_{Exp2}/CVG_{Exp1})，來量化結構對環境應力的回饋能力。
 - **未去芒組 (1.08)**：比值大於 1，顯示完整的「芒」在感受到土壤壓力時，不僅沒有變慢，反而展現更積極的萌發。這暗示芒在土壤中可能提供了物理支撐或槓桿作用，輔助瘦果發力破土。
 - **去芒組 (0.94)**：比值小於 1，代表失去芒結構後，瘦果的萌發速度被拖慢，可能受到物理阻力抑制。

此反轉現象證實，芒的完整性不僅關乎附著，更是種子在面對土壤應力時，維持高效出土能力的關鍵力學工具。

綜上所述，雖然大花咸豐草具備文獻所述之強大萌發韌性，但其倒刺與芒的完整性仍是維持此「強勢入侵能力」的重要力學基礎。種子在結構受損後仍能保有約 27% 的基本出苗能力，這種對「殘存活力」的高度保留，是其在力學干擾後仍能成功定殖的生物學關鍵。

七、大花咸豐草「韌性犧牲型」傳播之綜合理論模型

綜合本研究之幾何型態觀察、微觀力學量測、動態環境模擬及萌發表現分析，本文建構出一套完整的大花咸豐草瘦果「韌性犧牲型 (Toughness-Sacrifice)」傳播模型。此模型由以下四個核心維度組成：

- ① **高效且高剛性的刺入效能**：瘦果利用具備高抗挫曲能力 ($P_{cr} \approx 502.9 \text{ mN}$) 之倒刺結構，結合基部導角之應力支撐，確保在接觸宿主瞬間能順利嵌入纖維介質而不發生幾何失穩。
- ② **力學非對稱之鎖定機制**：利用幾何脆弱指標 K 引導應力分佈，使倒刺展現「軸向高剛性、徑向易屈服」的力學非對稱特徵，達成「易入難出」的單向鎖定效果，對抗高達自身重力百倍之慣性擾動。
- ③ **機械保險絲之能量耗散**：透過倒刺中段的「機械保險絲」機制，在脫離勾掛時以不可逆的塑性變形或結構脆斷吸收大量脫鉤能量。實驗證實平均單次傳播任務將犧牲約 4.4 根倒刺，以此結構劣化代價換取瘦果主體不致因強制拔除而發生致命損毀。
- ④ **生存代價與生物韌性之平衡**：萌發實驗證實，結構損耗並未損及種子內在發芽潛力 ($\text{Log-rank } p = 0.62$)。雖然去芒處理在面對 1 cm 覆土壓力時會產生 19.8% 的成功率折損，但其殘存之萌發韌性仍足以確保物種在傳播後的生存擴張。

這種「以微觀結構之局部損毀，換取巨觀尺度之傳播成功與種源存續」的策略，充分展現了大花咸豐草對隨機、多變之自然環境高度的生物力學適應性。

伍、結論

本研究透過微觀建模、靜態拉拔、動態慣性及衝擊實驗等多維度實驗，系統性地解析了大花咸豐草瘦果的附著與脫離機制，主要研究發現如下：

一、 咸豐草瘦果之生物力學特性

(一) 附著效能之深度最優化

瘦果之附著力與嵌入深度呈非線性關係，在 1.75 mm 深度下具備最高承重 (19.2 gw) 與最高「承重-有效倒刺比」(LEBR = 0.87 gw/barb)。此深度為結構鎖定與材料強度的最佳平衡點，過深之嵌入反而因應力集中導致結構過早失效。

(二) 階層式失效機制與韌性緩衝

對比微觀感測 ($F_{yield} \approx 0.5 \text{ mN}$) 與靜態拉拔的數據 (LEBR $\approx 8.5 \text{ mN}$)，證實倒刺具備優異的「階層式失效」特徵。倒刺在微觀屈服後，仍能透過組織韌性與幾何導角提供之幾何支撐，維持高出屈服門檻約 10 倍的後屈服承載力，為瘦果提供了巨大的動態緩衝空間。

(三) 極高之動態安全係數

力學量級對比顯示 (見表 8)，瘦果之靜態附著強度約為自然運動慣性力 (0.07 gw) 之 264 倍；而生物介入之拔除閾值 (30.25 gw) 更高達慣性力之 416 倍。高安全係數確保了瘦果能免疫多數自然運動干擾，實現遠距離傳播。

(四) 濕度觸發之軟化保護機制

水分会觸發倒刺由「高剛性、易脆斷」向「高韌性、易滑脫」的軟化轉換。雖然潮濕環境會降低約 50% ~ 70% 的附著強度，但有效倒刺留存率 (BRR) 提升至最高之 83.5%。此機制能在降雨情境下保護倒刺免於脆斷，維持傳播構造的完整。

(五) 結構損耗對生理潛力之無損性

研究證實去芒處理並未損及種子的萌發能力。在無阻力環境下，去芒組與完整組之萌發率無差異 (46.5% vs. 49.7%)，此發現證明倒刺結構具備極佳的「局部犧牲」特質，其損壞不會波及種子胚胎之活性。

二、 力學與生物學綜合討論：傳播穩定性與生存權衡

本研究建構之「韌性犧牲型」傳播模型，反映了咸豐草在演化上對「傳播成功」與「生存代價」的動態權衡。

(一) 形態導向的機械保險絲機制

倒刺的錐形縮減構造扮演了「機械保險絲」角色。透過將應力高峰由最強韌的基部導引至中段區域，確保失效發生在受控位置，避免芒主體或種皮發生致命性撕裂。

(二) 克服物理阻力之生物學代價

雖然倒刺損耗不影響發芽率，但在面對 1cm 覆土環境時 (Exp 2)，結構受損者展現出明顯的「環境代價」。去芒組之出苗成功率折損 (19.8%) 高於完整組 (15.7%)，且其 T_{25} 出土時間延遲達 21.7 小時。這說明倒刺結構在土壤微環境中仍具備輔助突破阻力的生物學功能。

(三) 「代價昂貴的單程票」傳播模型

綜合力學與萌發表現，大花咸豐草採取的策略是以不可逆的結構損毀換取傳播旅程的高可靠度 (表 8)。倒刺的斷裂並非缺陷，而是為了完成任務而預設的物理溢價。即便是帶著受損構造落地的瘦果，仍能保有約 27% 的基本出苗能力，這種對「殘存活力」的高度保留，是其成為強勢入侵物種的生物力學基礎。

表 8. 不同物理維度下之受力等級、能量吸收與結構損耗 (BRR) 綜合對比表

物理維度 / 情境	核心指標	數值大小 (平均值)	有效倒刺留存率 (BRR)
— 受力對比 (Force Magnitude) —			
動態 (5Hz 快跑)	慣性力 ($F = ma$)	≈ 0.0727 gw	$\approx 100.0\%$
靜態 (1.75mm 嵌入)	靜態拉拔力 (F_{stat})	19.20 gw	80.2%
人手 (主動介入)	生物性拔除力	30.25 gw	58.1%
— 能量對比 (Energy Consumption) —			
衝擊 (4cm 落下)	下墜動能 (E_k)	1.04 mJ	71.1%
衝擊 (10cm 落下)	下墜動能 (E_k)	2.61 mJ	60.5%
累積失效閾值	累積吸收能量	5.0 ~ 7.0 mJ	< 40.0%

大花咸豐草採取「易入難出、出則必損」的非對稱策略 (表 8)。當脫離能量超過 5 ~ 7 mJ 門檻，結構即啟動保險絲式的連鎖失效。這種以不可逆的結構損毀換取傳播旅程高可靠度的策略，在力學上精準定義了其傳播行為是一張「代價昂貴的單程票」：倒刺的斷裂並非缺陷，而是為了完成附著任務而預設的物理代價。

陸、研究限制與未來展望

一、力學建模之深化

本研究目前以峰值力作為失效判準。然而，瘦果脫離實際上是包含滑動摩擦與塑性形變的連續能量消散過程。未來應透過高速攝影與力—位移曲線下面積進行積分，精確區分「彈性儲能」與「摩擦耗散」，以修正現有靜態模型之誤差。

二、黏彈性效應與載荷路徑

生物組織具備顯著的速率致硬效應。未來研究應增加不同加載速率與多軸受力（側向剪力、旋轉力矩）的對比實驗。特別是目前計算的安全係數是在垂直受力下的理想極值，在存在剪切分量的實際情境中，該數值之變動規律值得深入探究。

三、環境交互作用之探究

本研究證實了覆土深度對受損瘦果的影響，未來研究可進一步探討不同土壤質地、含水量與倒刺損傷程度之交互作用，以更精確預測咸豐草在不同棲地（如硬實地 vs. 鬆軟土）的定殖成功率。

四、仿生設計之應用潛力

本研究量化之幾何脆弱指標 K 與階層式失效特徵，可為研發「單向穩定、過載損毀」之仿生掛鉤提供設計參數。此類結構可應用於一次性醫療貼片或環境偵測器的自動佈署裝置，實現在低能量輸入下穩固附著、在高能量衝擊下安全脫離的功能。

參考文獻

- Gibson, Lorna J (2012). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. In: *Journal of the royal society interface*, 9. (76), 2749–2766.
- Niklas, Karl J (1992). *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago press.
- Zhang, Keliang, Linjun Yao, Yin Zhang & Jun Tao (2019). Achene heteromorphism in *Bidens pilosa* (Asteraceae): differences in germination and possible adaptive significance. In: *AoB Plants*, 11. (3), plz026.
- 徐玲明、林訓仕 (2005)。三種鬼針草植株，種子外觀形態及發芽率之比較。 *中華民國雜草學會會刊*，26 (1)，33–42。

附錄 A. 研究工具應用說明

本研究為跨學科領域之探索，涉及生物學、材料力學與數據科學。為確保研究深度與嚴謹性，本團隊採用以下研究工具進行輔助研究：

- ① **AI 跨領域理論輔助**：為克服高階力學建模（如歐拉-白努利方程）與 R 語言程式編寫之門檻，本團隊諮詢 AI 工具（如 Gemini）作為「方法論顧問」協助理論理解，將倒刺之生物觀察轉化為「懸臂樑（Cantilever Beam）」物理模型。透過 AI 的引導，團隊理解了撓曲公式之物理意義，並據此推導出適合本研究之幾何脆弱指標 K 。此外也透過 AI 工具設計實驗分析與視覺化的 R 語言程式碼、視覺化工具與進行科學排版。所有物理模型與統計結果均經由實驗數據（如微力感測器實測）進行二次驗證，確保科學推論之真實性。
- ② **R 語言統計科學**：本研究所有數據分析皆使用 **R 語言** 進行。包含使用 Shapiro-Wilk 檢定確認數據常態性、Welch Two Sample t-test 進行差異性檢定，以及利用生存分析量化瘦果之留存時間。
- ③ **LaTeX 科學排版**：為精確呈現生物力學中之數學方程式（如截面二次矩與應力分布函數），全論文採用 **LaTeX** 系統進行編排。這確保了學術溝通的精確度，並使圖表編號與參考文獻能符合國際學術規範。