

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學科

052001

白蟻在不同粗糙表面的抓附比較

學校名稱： 國立彰化高級中學

作者：	指導老師：
高二 張雨恩	張佑慈

關鍵詞： 白蟻、功能形態、生物力學

摘要

昆蟲附著力學中，常用爪與爪間體進行分析。因大多數白蟻沒有爪間體，為了解爪鉤附著時的功能，故選用白蟻單純對爪鉤進行探討。另外，白蟻是常見居家害蟲，會侵蝕建材並危害建築，但白蟻的抓附能力與偏好至今仍未被研究。因此，希望量化白蟻的附著力，並尋找不使白蟻攀附的材料，減少對建築的危害。本研究以常見居家白蟻為對象，首先實施形態觀察，再以自製離心轉盤對抓附能力進行量化，最後使用掃描式電子顯微鏡對爪鉤構造進行分析。發現使白蟻展現最佳附著力的表面顆粒，會受脛節、跗節、爪鉤構成之範圍影響。而顆粒大小與爪鉤尺度、附著形態、微棲地皆有關係。此外，兵蟻在質量、體型與附著表現上均優於工蟻，此結果受階級分工、爪鉤形狀影響。

壹、前言

一、研究動機

動物的附著構造與環境的關係，是生物力學中重要的問題。白蟻長年被認定為居家害蟲，常出現在家中牆壁、木材，侵蝕並破壞建築構造。與此同時，也顯示出白蟻特殊的附著力與附著偏好。因此不同物種、棲地的白蟻，其附著構造與生存環境、條件，應存在重要的關係。先前實驗室的學姐針對螞蟻的附著構造爪(claw)與墊(pad)，在不同基質的表面上所對應的附著力大小，以及爪與墊的轉換機制(Tsai, 2014)做了研究。但是白蟻的附著機制與足部形態，在國內外卻鮮少有人探討和觀察。此外，大部分昆蟲足部均具有爪鉤與爪間體(arolia)兩個構造，而白蟻缺少爪間體，因此可以藉由白蟻單純探討爪鉤的作用。也可將研究結果應用於白蟻防治，以研發不易使白蟻攀附的材料。所以了解白蟻的足部形態和附著力，與功能形態、行為生態和微棲地的關係，以及對應的生存功能，便是個值得探討的課題。

二、研究目的

- (一) 找出可以測試白蟻附著力與摩擦係數的方法與裝置
- (二) 了解白蟻附著於粗糙表面時的足部末端形態
- (三) 了解白蟻在不同平均顆粒大小之砂紙的附著表現
- (四) 分析不同物種之白蟻的爪鉤形狀、尺度及差異
- (五) 比較各自蟻物種間的抓附能力
- (六) 分析白蟻附著表現與爪鉤尺度、附著形態的關係

(七) 探討白蟻足部附著表現與階級分工的關係

(八) 探討白蟻抓附表現、足部結構與微棲地間的關係

三、文獻回顧

(一) 白蟻簡介與身體構造

1. 白蟻簡介

白蟻(termite)，又稱為螱，屬於蜚蠊目，為社會性昆蟲。白蟻舊時的分類位階為等翅目，常被誤認為螞蟻，但是現已證實白蟻為蜚蠊目的一員，且螞蟻屬於膜翅目，與白蟻親緣關係較接近的其實為同屬蜚蠊目的蟑螂。白蟻為不完全變態，缺少蛹期。個體扁且較一般螞蟻柔軟，體型較大，大部分呈乳白色，具有咀嚼式口器，以纖維素資源為食(Traniello & Leuthold, 2000)，觸角呈念珠狀，沒有眼睛，僅具有簡單的複眼辨別方向與陽光。

2. 階級分工

- (1) 工蟻：負責蟻巢中大部分的工作，例如覓食、育幼、築巢等(圖 1A)。
- (2) 兵蟻：負責保護群體，特徵為大部份物種頭部具有特化的大顎(圖 1B)。
- (3) 生殖型：雄蟻與雌蟻，分別為蟻王與蟻后。蟻王負責讓卵受精；蟻后負責產卵。具有翅，會在特定時期進行婚飛(圖 1C)。
- (4) 補充生殖型：特定物種才有，負責替補死亡生殖蟻進行生殖工作(圖 1D)。



圖 1 不同階級之白蟻。圖 1A 至圖 1D 分別為黃原鼻白蟻工蟻、黃原鼻白蟻兵蟻、格斯特家白蟻有翅型(Yang & Li, 2012)、黃原鼻白蟻補充生殖型(Chiu, n.d.)。(圖 1A、2A：作者自行拍攝；1C：李後鋒攝；1D：邱俊禕攝)

3. 白蟻身上之特殊構造

在探討白蟻足部之抓附表現時，需藉由物理實驗得知，所以白蟻身上之特殊構造皆有可能影響它的物理表現，故須將這些結構納入影響實驗結果的因素中。相較於螞蟻與典型昆蟲之頭胸腹具有明顯分隔，白蟻的身體呈桶狀，胸腹較沒有明顯分隔，腰部不明顯。

大部份兵蟻以鉗咬型大顎(圖 2A)夾咬敵人，如：家白蟻屬、原鼻白蟻屬；有些兵蟻則大顎退化，改用頭部發達的管狀構造(圖 2B)噴出化學物質來防禦，如：象鼻型白蟻；另一類兵蟻具彈性大顎，可分成兩型：對稱型透過兩邊大顎相互擠壓、滑開彈擊；不對稱型(圖 2C)的白蟻左大顎呈彎曲形狀，遇到敵人時使用右大顎把左大顎壓得更彎，再滑開彈擊，如：霧社華歪白蟻和新渡戶歪白蟻。



圖 2 不同大顎形態之白蟻。圖 2A 為格斯特家白蟻兵蟻之鉗咬型大顎；圖 2B 為小象白蟻兵蟻頭部之退化管狀構造；圖 2C 為新渡戶歪白蟻之不對稱型大顎(Hu, 2018)。

(圖 2A、2B：作者自行拍攝；圖 2C：胡正恆攝)

(二) 小型昆蟲的爪與墊之運作機制

早年的研究即針對許多昆蟲的足部機制進行研究，在足部跗節(tarsus)尾端，通常會具有爪與墊(圖 3A)兩個構造與表面的接觸，如：虎頭蜂、鍬形蟲等。以螞蟻為例，近幾年即有研究針對螞蟻的轉換機制進行探討。得到的結果如下，螞蟻在粗糙表面以爪進行附著，而當接觸表面的顆粒半徑過小時，爪將失去作用，改用墊來進行黏貼與附著，故樹棲型螞蟻的墊常會表現較好的性能(Tsai, 2014)。

(三) 白蟻的附著構造

幾年前國外的研究室針對白蟻附著構造進行觀察(Croslan & Scheffrahn, 2005)，發現白蟻不同於大部分的昆蟲，除了少數幾個物種(例如：截頭堆砂白蟻)(Yang & Li, 2012)外，幾乎沒有爪間體(arolia)的構造(圖 3B)，僅藉由爪來進行與表面的接觸。因此本研究為深入探討爪對於昆蟲附著的機制，即選用白蟻作為實驗對象，單純針對爪的表現與附著機制進行分析。

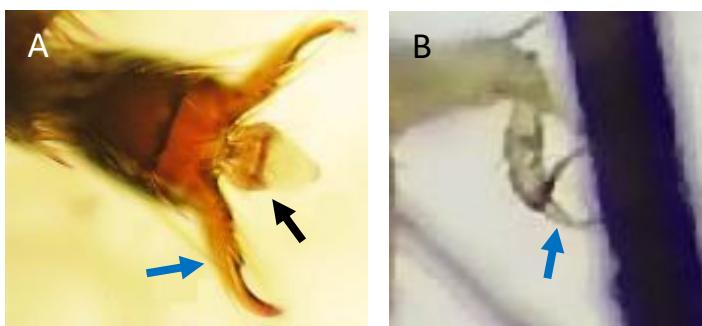


圖 3 螞蟻與白蟻足部末端結構比較。圖 3A 為黑棘蟻(Tsai, 2014)，具有爪(藍色箭頭)與墊(黑色箭頭)；圖 3B 為黃原鼻白蟻，僅具有爪(藍色箭頭)。

(圖 3A：蔡餘慶攝；圖 3B：作者自行拍攝)

(四) 白蟻生態區位分類

藉由白蟻在所處環境中扮演的角色，以及與生態的關係，可以將不同物種的白蟻由以下方式進行分類。

1. 以居住地進行白蟻的分類：白蟻巢由堅硬的泥土和咀嚼過木材製成的紙狀物質組成，環境黑暗、潮濕、涼爽。可將白蟻由居住地分為以下類型，(1) 木棲型白蟻：尋找木材築巢，啃食木材，可分為乾木白蟻與濕木白蟻；(2) 土棲型白蟻：棲息於地底、土中，會在土中開闢泥道行走，偏好潮濕環境；(3) 土木兩棲型白蟻：主要出現於乾木、活樹木或埋在土中之木材，以乾枯的植物、木材為食。
2. 以棲地與食物來源的關係進行白蟻的分類：(1) 巢食分離型：巢體與覓食區域分開；(2) 巢食共處型：覓食區域即為巢體；(3) 巢食連結型：築巢於土中，但能構築地下隧道或地面泥道，經由土壤或地面到達其他木材覓食(Chiu, 2014)。

(五) 附著表面與微棲地

欲探討白蟻附著與環境的關係，由於白蟻的尺度較小，單純探討白蟻與棲地的關係可能無法發現彼此間的連結。因此，微棲地才是會影響白蟻附著的因素。

微棲地為包含於棲地內的一個較小的區域，具有特定的環境特徵，能提供特定生物的生存需求。環境變化比棲地更為細微。微棲地可能具備不同的溫度、濕度、光照條件(例：樹皮、建物、積水...)，僅能支持特定類型物種生存，不同的微棲地也會具有獨特的生態功能。

(六) 實驗白蟻樣本介紹

本實驗希望能對白蟻附著進行探討，以防止白蟻對於家中建築結構的侵害。因此，選用了兩種居家最常見的害蟲(台灣家白蟻與格斯特家白蟻)；小象白蟻則是自然環境中容易發現的物種，以利對於不同微棲地與功能的比較；黃原鼻白蟻在質量與尺度均與其餘物種有顯著差異，是觀察功能形態的良好對象。

1. 台灣家白蟻(*Coptotermes formosanus*)：兵蟻頭部具窗點，可在攻擊時分泌乳白色液體。土木兩棲，巢食連結型。全台低海拔地區皆有分佈，為台灣地區所有白蟻種類中危害人類家屋情況最嚴重者(Yang & Li, 2012)。屬於鼻白蟻科家白蟻屬。
2. 格斯特家白蟻(*Coptotermes gestroi*)：與台灣家白蟻同屬於家白蟻屬，兵蟻亦會於頭部的窗點分泌乳白色液體。土木兩棲。出現在低海拔區域，分布在臺中以南的

區域，對台灣危害嚴重。亦屬於鼻白蟻科家白蟻屬。

3. 小象白蟻(*Nasutitermes parvonasutus*)：具體棲息地仍無法界定，通常喜居住於土壤與木材交界處，或築巢於較乾燥之垂直枯木(Wu, 2001)。取食枯枝、落葉、腐爛的倒木。屬於白蟻科象白蟻屬。
4. 黃原鼻白蟻(*Prorhinotermes flavus*)：具有補充繁殖蟻。土木兩棲。分布於南海周圍的熱帶島嶼。巢食共處型。屬於鼻白蟻科原鼻白蟻屬(Li et al., 2011)。

貳、研究設備與器材

一、實驗設備(表 1)

表 1 實驗設備示意圖。(皆由作者自行拍攝)

攝影機(240fps) 型號：NOH-AN00	電源供應器 型號：GPD-3303S	離心轉盤
		
解剖顯微鏡 型號：STEMI 305.EDU	環境掃描式電子顯微鏡 (Environmental scanning electron microscope, ESEM) 型號：TM-3000	微量天秤 型號：Balance XS104
		

(一) 自製離心轉盤介紹

自製離心轉盤藉由連接電流輸出器，產生固定的轉速。在實驗時調整電源供應器的電壓，產生不同的轉盤轉速，逐次實驗找出恰使白蟻脫離原始位置時的轉速，即可得出白蟻在特定粗糙度砂紙的靜摩擦係數。欲確認離心轉盤接受電源供應器輸出電壓所產生之轉速的穩定性，先藉由設備校正，針對不同電壓下的轉速進行攝影

與計算，以確保轉盤所提供的轉速能始終保持固定，並且沒有切線加速度的產生。

(二) 離心轉盤設備校正步驟

藉由記錄離心轉盤上某特定點在旋轉時的運動軌跡，了解電壓與轉速的關係。

首先在轉盤上貼方格紙，並標示出欲測質點。控制電源供應器所輸出之電壓，從電壓 1.0V 開始，每次實驗逐次增加 0.5V，直到 5.0V。開始旋轉後，以攝影機(480fps)從轉盤上方水平記錄質點運動軌跡。將紀錄的影片匯至軟體 Tracker，設定影片幀率、比例尺，再計算特定質點旋轉一圈後回到相同位置所需的時間 T(s)。最後將從 Tracker 得到的數據匯入 Excel，由 T(s) 計算出轉速(rpm)。每種電壓重複實驗五次，取平均以製作轉盤電壓轉速校正曲線，並計算標準差，藉以衡量離心轉盤之穩定性。

(三) 校正結果

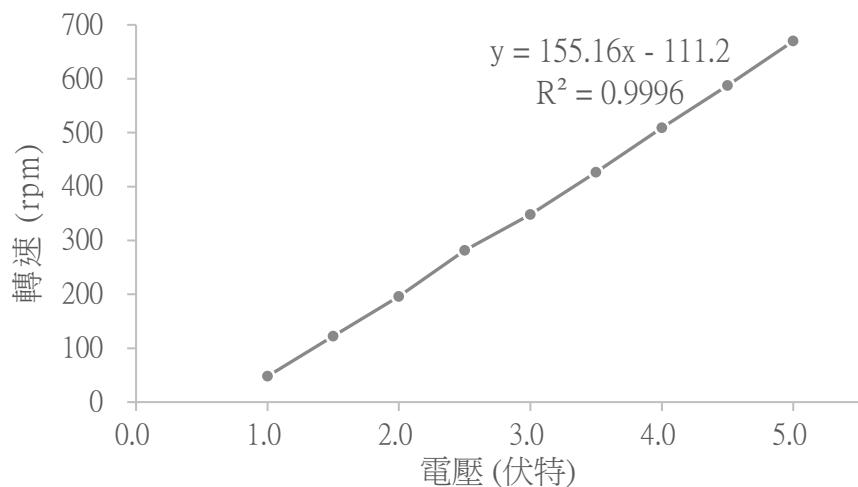
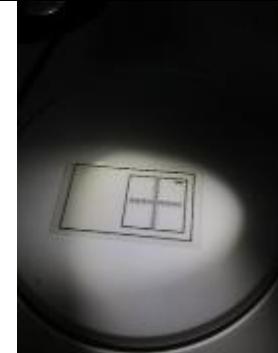


圖 4 轉盤電壓轉速校正曲線。(作者自行繪製)

從實驗結果可推知，電源供應器所輸出之電壓與轉速大致成線性關係，關係式為 $y = 155.16x - 111.2$ ，其中 x 為電壓(V)； y 為轉速(rpm)。且同種電壓下，各數據間的標準差相當小(介於 0.001 至 0.063 之間)，繪製於關係圖上亦無法看出來。可知離心轉盤的轉速相當穩定，旋轉過程中不會有切線加速度產生，呈等速度圓周運動。

二、實驗器材

表 2 實驗器材示意圖。(皆為作者自行拍攝)

鑷子	方格紙	酒精	塑膠培養皿
液態氮	電子顯微鏡膠條	腳架	砂紙 (號數：P180、P240、P320、P400)
顯微鏡比例尺	軟鑷	塑膠離心管	ESEM 載台
			

三、分析軟體

- (一) Tracker：對附著力實驗的影片進行分析。
- (二) Image J：將所紀錄之照片進行相關數據的量化。
- (三) Excel：將數據進行處理，得到附著力、摩擦係數等資料。
- (四) Adobe Illustrator：將解剖顯微鏡、ESEM 下紀錄之照片進行等比例描圖分析。

表 3 實驗分析軟體示意圖。(圖片擷取自各程式頁面)

Tracker	Image J	Excel	Adobe Illustrator
		 Excel	

四、白蟻物種

除了進行電子顯微鏡掃描時，由於機器需要抽真空，故使用死亡白蟻外。其餘實驗(附著力實驗、體長與質量量測、行為觀測)皆使用保存於室溫，且棲息於各自巢(圖 5)中的白蟻。台灣家白蟻(*Coptotermes formosanus*)、格斯特家白蟻(*Coptotermes gestroi*)、黃原鼻白蟻(*Prorhinotermes flavus*)居住於濕木以及濕泥土混和的巢體，以塑膠條密封保存，定期會以滴管補充水分、清除死亡個體；小象白蟻(*Nasutitermes parvonasutus*)居住於鬆土與木板交接處，環境較乾燥，以通風塑膠盒保存，同樣定期以滴管補充少量水分、清除死亡個體。進行實驗時，將會挑選足部結構健全、活動力正常、沒有生病的成體白蟻進行實驗，年老或幼體將繼續留於巢中。



圖 5 實驗用白蟻樣本之巢。左側三個密封巢體分別裝台灣家白蟻、格斯特家白蟻、黃原鼻白蟻；右側塑膠盒裝小象白蟻。(作者自行拍攝)

表 4 各物種/階級之白蟻形態。(作者自行拍攝)

	工蟻	兵蟻
台灣家白蟻		
格斯特家白蟻		
小象白蟻		
黃原鼻白蟻		

(單位：mm)

參、研究過程與方法

一、研究架構圖

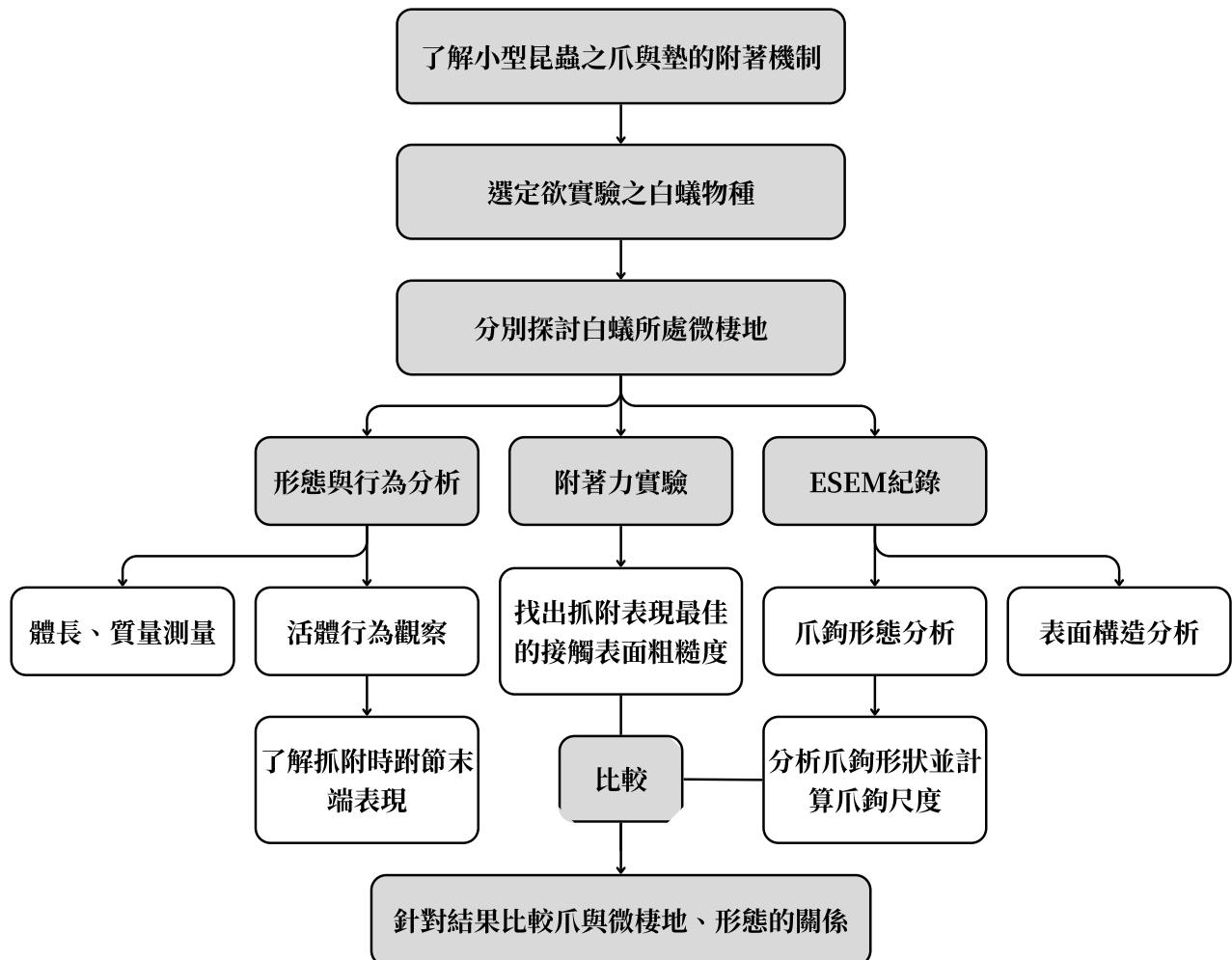


圖 6 實驗方法與流程。(作者自行繪製)

二、實驗方法

(一) 白蟻的形態與行為分析

1. 體型與質量的量測

探討白蟻爪鉤對抓附表現的影響時，體型大小與質量是需要考慮以及比較的因素。因此，藉由解剖顯微鏡加上比例尺拍攝活體白蟻，並匯入 ImageJ 分析實際大小以計算體長；將三隻放上微量天秤，得到重量後除以實際白蟻數目，以得到每隻白蟻的平均質量。

實驗步驟：

- (1) 將比例尺放上解剖顯微鏡。
- (2) 分辨出同種白蟻巢中的工蟻或兵蟻，每次取同一種階級放入解剖顯微鏡。

- (3) 在視野下找出自白蟻，並調整焦距。
- (4) 利用顯微鏡轉接器，記錄下白蟻完整出現在視野中的畫面。
- (5) 將拍攝的照片匯入 ImageJ，設定好比例尺。
- (6) 分別量測出自白蟻的頭長、胸長加腹長、顎長(圖 7)。

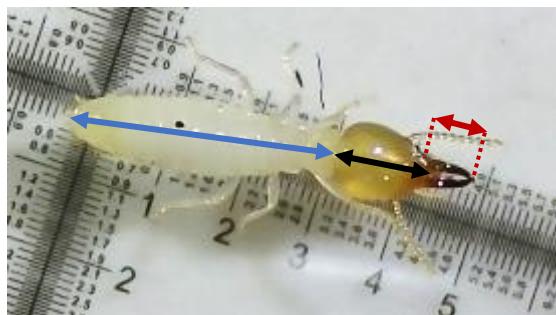


圖 7 量測白蟻樣本的體長。此樣本為台灣家白蟻兵蟻，藍色箭頭表示胸長加腹長；黑色箭頭表示頭長；紅色箭頭表示顎長。(作者自行拍攝、繪製)
(單位：mm)

- (7) 定義頭長、胸長加腹長、顎長，三者相加為白蟻的總體長。
- (8) 取三隻白蟻進行量測並取平均。
- (9) 在微量天秤中放上培養皿並歸零。
- (10) 利用軟鑷夾取同物種同階級之白蟻，放入微量天秤中的培養皿。
- (11) 將得到的體重除以白蟻數量，以得到平均質量。

2. 活體行為觀察

欲了解在不同粗糙度之表面(微棲地)活動時，白蟻的爪鉤是否會有運動狀態或是形態上的變化。抓取活體白蟻使其攀附於不同粗糙度的砂紙，放在解剖顯微鏡下，並將視野聚焦在白蟻的爪鉤與砂紙的接觸表面，拍攝記錄爪鉤的形態。以從影片中了解白蟻在附著於砂紙時，爪鉤的狀態變化以及爪鉤和接觸表面的位置關係。

(二) 探討白蟻的附著力

欲得知白蟻的附著力，可藉由實驗得出白蟻在不同表面的摩擦係數，即可反應出附著力大小。測量摩擦力的方式中，最常見的是斜面實驗，但考量白蟻是活體，會在斜面上移動，且經由螞蟻實施前實驗時便發現牠的附著力非常大，就算斜面接近垂直也可能不會移動或掉落。

因此，藉由轉盤連接電源供應器以控制電壓，改變轉盤轉速。將白蟻放在轉盤上並旋轉，當達到一定轉速時，白蟻將會沿切線方向脫離原位置，此瞬間所受到之向心力即等於砂紙所給予的最大靜摩擦力，每次實驗逐步增加電壓，直到白蟻開始被甩出轉盤外，找出包含白蟻恰脫離原始位置之瞬間前的影格，由於影格間的時間差極小，可由座標計算極小時間內白蟻的切線速度。實驗過程皆由高速攝影機

(240fps) 從轉盤正上方水平紀錄(會使用攝影機內建水平儀進行測量)，並在轉盤貼上方格紙以作為比例尺，所紀錄之影像最後皆匯至軟體 Tracker 及 Excel 以進行附著力與摩擦係數的計算。

使用公式：向心力 = 最大靜摩擦力， $\frac{mv^2}{r} = \mu mg$

$$\text{靜摩擦係數 } \mu = \frac{v^2}{rg}$$

其中，m (kg)為白蟻質量；v (m/s)為切線速度；r (m)為旋轉半徑； μ 為靜摩擦係數；g為重力加速度。

為了找出接觸表面與白蟻附著力的關係，在上述實驗的離心轉盤上貼上不同平均顆粒大小的砂紙 (以號數 P180、P240、P320、P400 的砂紙進行實驗，並藉由查表 (附件一)得知不同砂紙號數所對應的粗糙度、平均顆粒大小，上述砂紙所對應的平均顆粒直徑分別為 82 μm 、58.5 μm 、46.2 μm 、35 μm)，來模仿白蟻在不同微棲地(接觸表面)的情況，藉此了解白蟻在不同粗糙度之表面的附著力變化。

實驗步驟：

1. 將離心轉盤接上電源供應器。
2. 抓取白蟻，放上已黏貼砂紙的離心轉盤。
3. 以攝影機(240fps)從上方記錄整個實驗過程(圖 8)。

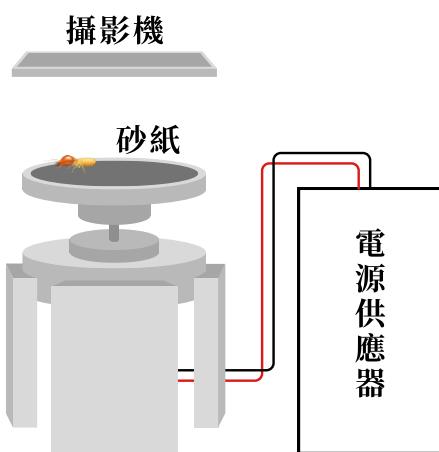


圖 8 實驗裝置架設圖。右側電源供應器連接左側自製離心轉盤，離心轉盤平台上方貼著實驗所需砂紙(深色圓形部分)，並在砂紙上放上活動力正常的白蟻(淺黃色示意圖)，砂紙上貼方格紙作為比例尺。(作者自行繪製)

4. 每次實驗固定一個電壓旋轉白蟻，找出可使白蟻飛出的電壓。
5. 記錄所有白蟻恰飛出的瞬間。
6. 將紀錄的影片匯至軟體 Tracker，設定影片幀率、比例尺，並加入座標。
7. 找出自蟻恰開始移動前的五個影格。
8. 記錄此五個影格中白蟻的 x、y 座標隨時間之變化與白蟻之旋轉半徑(圖 9)。
9. 將從 Tracker 得到的數據匯入 Excel。

10. 由白蟻的 x、y 座標得到白蟻恰移動前的速度 v ($v = \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{\Delta t}$)。
11. 利用速率 v 與微量天平所測得的質量 m 計算得出自白蟻所受向心力。
12. 藉由向心力等於最大靜摩擦力，找出自白蟻在不同號數砂紙的靜摩擦係數 μ 。
13. 重複實驗四次並取平均。



圖 9 Tracker 程式計算畫面。綠色圓為白蟻尚未拋出的軌跡，紅色點為白蟻恰脫離原始位置前的影格，白色箭頭指向恰脫離原始位置之白蟻沿切線方向飛出。
(作者自行拍攝、繪製)

(三) ESEM 掃描

由於解剖顯微鏡與複式顯微鏡的放大倍率有限，為了更清楚了解不同物種與階級之白蟻的爪鉤實際形狀、表面粗糙程度與彎曲程度，將會使用環境掃描式電子顯微鏡(Environmental scanning electron microscope, ESEM)進行白蟻爪鉤的掃瞄，以記錄完整的爪鉤型態，並利於爪鉤形態分析與尺度量測。

實驗步驟：

1. 將白蟻泡入 75% 酒精中，進行樣本前處理。
2. 在 ESEM 載台上貼上專用膠條，並將整個裝置放在解剖顯微鏡下。
3. 將解剖顯微鏡的視野聚焦在白蟻(前肢、中肢、後肢)的爪鉤上。

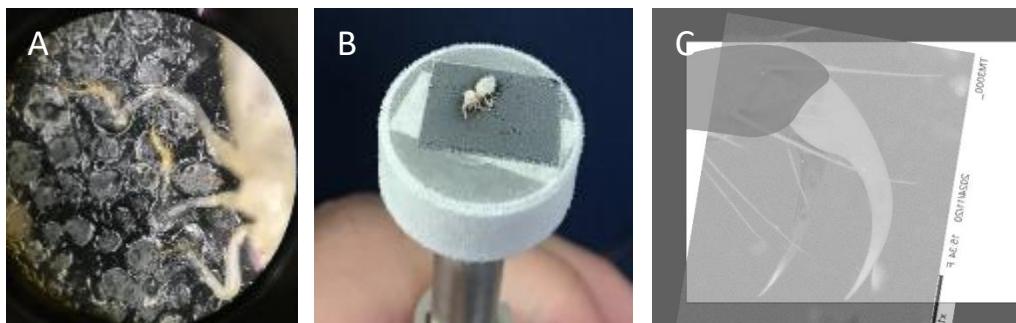


圖 10 以 ESEM 了解爪鉤形態與尺度。圖 10A 為解剖顯微鏡下的白蟻爪鉤；圖 10B 為泡入液態氮後之冰凍白蟻；圖 10C 為使用 Adobe Illustrator 進行描圖示意圖。(圖 10A、10B：作者自行拍攝；圖 10C：作者自行擷取自程式畫面)

4. 在視野下，以軟鑷調整白蟻爪鉤角度，使其水平貼在膠條上(圖 10A)。
5. 將調整好的白蟻泡入液態氮(圖 10B)，降低白蟻被電子打中而離開視野的機率。

6. 將 ESEM 破真空，並將冰凍的白蟻與載台放入 ESEM 中。
7. 放入白蟻之後，進行 ESEM 的抽真空。
8. 從電腦中進行焦距、放大倍率、對比度與亮度的調整。
9. 降低電子打入的速率，以取得清晰的照片。
10. 將照片放入 Tracker，計算爪鉤尺度。
11. 將照片放入 Adobe Illustrator，進行等比例的爪鉤形狀描圖(圖 10C)。

肆、研究結果

一、形態量測

所有的形態測量(包含體長與質量)皆是從巢體中以軟鑷抓取三隻活動力正常的成體白蟻進行拍攝。體長是藉由量測三隻白蟻的頭長、胸長加腹長、顎長，分別計算後再取平均，以得到個別的數據，而三個數據相加即為體長。質量量測的部分，由於白蟻的質量過小，所以每次量測會將三隻白蟻放入微量天秤，將得到的結果除以白蟻數目，以獲取白蟻間的平均質量。(*** 表示 t-test 統計結果為 p 值 ≤ 0.001 ； **** 表示 t-test 統計結果為 p 值 ≤ 0.0001)

(一) 各物種/階級間質量比較

由於白蟻的質量過小，質量的測量為每次取三隻成體白蟻放上微量天平得到總重，再除以白蟻數目得到每隻白蟻的平均質量。

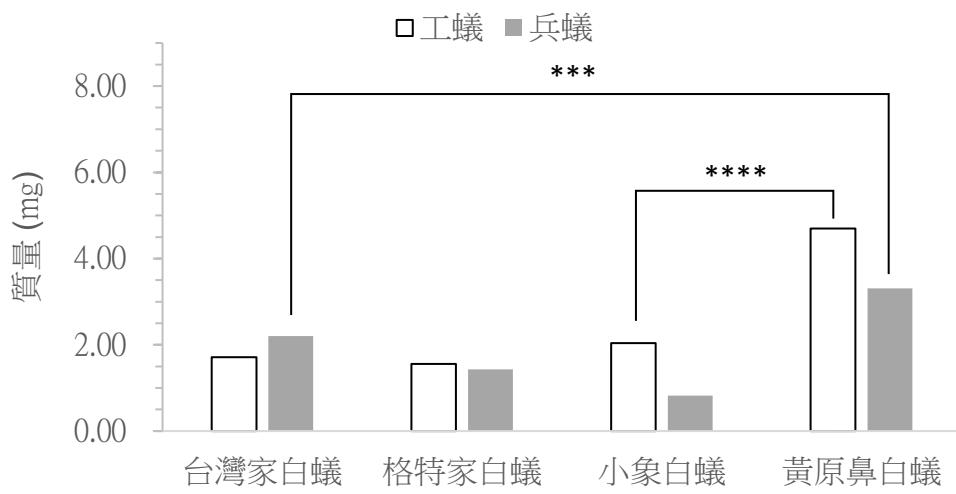


圖 11 各物種/階級間質量比較。(作者自行繪製)

除了台灣家白蟻外，其餘物種的工蟻質量皆大於兵蟻。黃原鼻白蟻的質量(工蟻：4.70mg；兵蟻：3.31mg)明顯大於其餘三個物種，以工蟻的質量最大。小象白蟻兵蟻(0.82mg)質量也明顯小於工蟻(2.04mg)，且在所有物種中為最小。

(二) 各物種/階級間體長比較

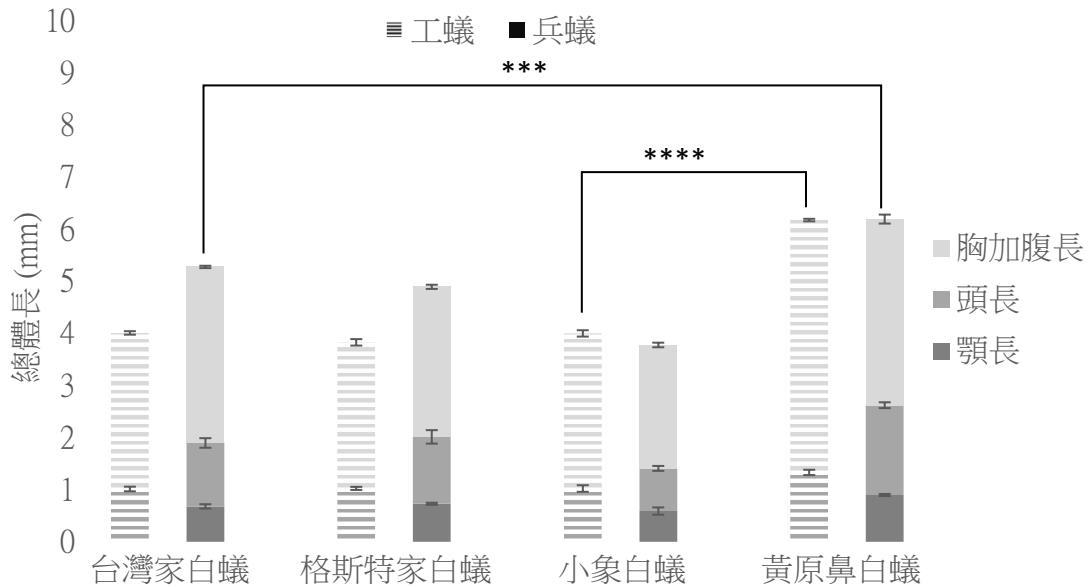


圖 12 各物種之顎長、頭長、胸加腹長比較。(作者自行繪製)

雖然在質量數據中，大部分的工蟻皆大於兵蟻，但是從體長數據可知，兵蟻的體長大致上會略大於工蟻。而黃原鼻白蟻的體型(工蟻：6.19mm；兵蟻：6.21mm)顯著高於其餘三個物種，小象白蟻的體型略小，其中兵蟻體型(3.78mm)為最小。

除了小象白蟻外，其餘物種的兵蟻體型皆大於工蟻，第一個原因為相較於其他物種之兵蟻的頭部皆大於工蟻，小象白蟻之兵蟻的頭部(0.82mm)較小，相對於其他物種亦有相同結果。推測可能是由於此三種白蟻(台灣家白蟻、格斯特家白蟻、黃原鼻白蟻)具有鉗咬型大顎來夾咬敵人，有攻擊與防禦的作用，且身體較為強壯，故體長較兵蟻長。而小象白蟻屬於象白蟻屬，特徵為大顎退化，改用頭部發達的管狀構造噴出化學防禦物質及黏液來防禦外敵，故大顎並沒有以物理性的方式進行攻擊，不需要強壯有力的大顎。

二、行為觀測

從所有的觀測照片中可以發現，白蟻在展現最佳附著表現時，脛節末端的尖刺構造會接觸到表面。圖 13B 與圖 14B 為行為觀測影片中，白蟻即將脫離接觸表面前的運動狀態，可知若是脛節末端未確實接觸到表面，將會增加掉落或脫離表面的風險。

此外，從圖 16B、圖 19C 可知，白蟻在附著時，不一定所有的足部均會表現出能夠展現最佳附著力的形態。僅需要其中一些足部能抓緊接觸表面即能穩固的附著。

將圖 19A 與其餘物種之白蟻附著時形態比較，發現白蟻在不同的附著狀態下，跗節與前跗節(爪鉤)會形成不一樣的角度，以適應不同狀態、粗糙度的接觸表面；將圖 20A 與其餘附著時形態比較，可知白蟻的跗節末端在進行不同狀態的附著時，兩爪鉤間的開合角度會有所差異。

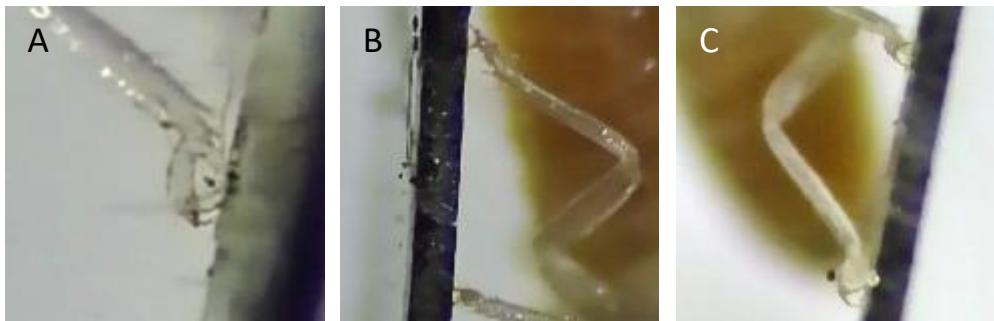


圖 13 台灣家白蟻工蟻。(作者自行拍攝)

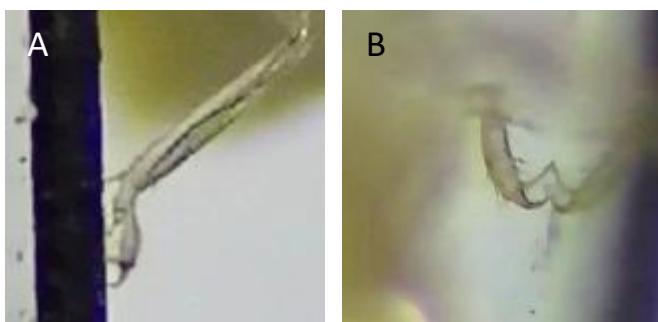


圖 14 台灣家白蟻兵蟻。(作者自行拍攝)

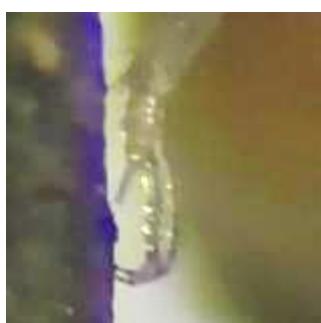


圖 15 格斯特家白蟻工蟻。(作者自行拍攝)

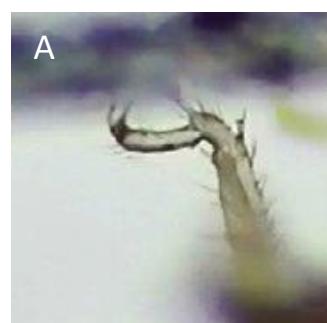


圖 16 格斯特家白蟻兵蟻。(作者自行拍攝)



圖 17 小象白蟻工蟻。(作者自行拍攝)



圖 18 小象白蟻兵蟻。(作者自行拍攝)

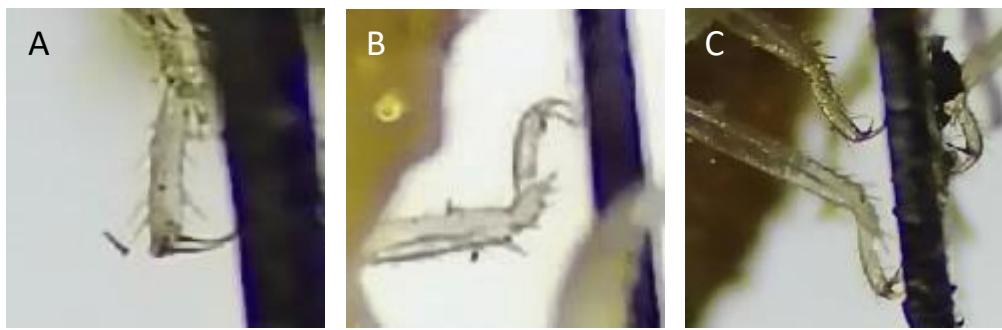


圖 19 黃原鼻白蟻工蟻。(作者自行拍攝)

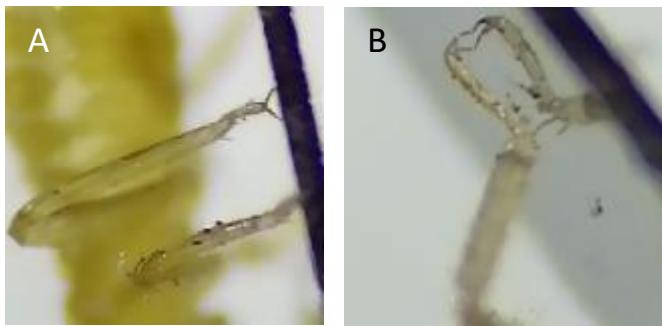


圖 20 黃原鼻白蟻兵蟻。(作者自行拍攝)

三、附著力實驗

本實驗的所有數據在計算後，會剔除掉白蟻沒有沿切線方向拋出，以及和其餘數據差距過大的樣本。由於在進行實驗時，白蟻的狀況常常不一，有時會不情願用力抓住表面、沒有抓住接觸表面、翹起足部或是於開始旋轉時行走。這些狀況可能導致白蟻在一開始即被拋出，導致所計算出的靜摩擦係數過小。

各物種、階級的附著表現分列如下：

(一) 台灣家白蟻

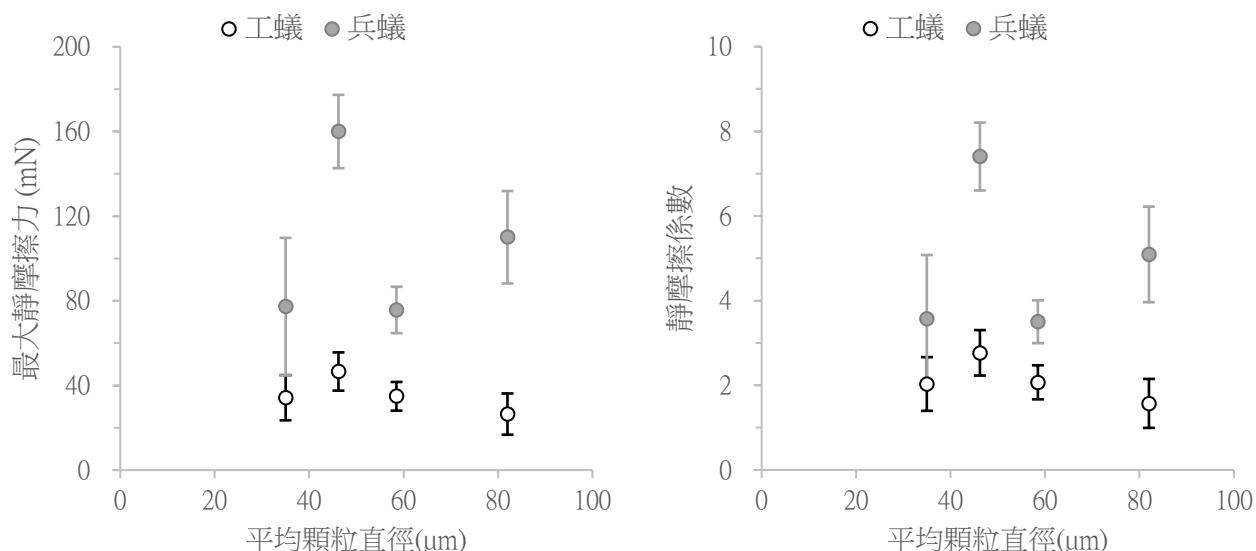


圖 21 台灣家白蟻在不同粗糙度砂紙所受最大靜摩擦力、靜摩擦係數。(作者自行繪製)

台灣家白蟻工蟻在平均顆粒直徑 $46.2\mu\text{m}$ 附近時有較好的附著表現(46.6mN)，而兵蟻在平均顆粒直徑為 $46.2\mu\text{m}$ 、 $82\mu\text{m}$ 時，能夠展現較高的附著能力($46.2\mu\text{m}$: 160.0mN； $82\mu\text{m}$: 110.0mN)，從能夠展現最佳附著力的砂紙數量進行比較，兵蟻的摩擦力與顆粒半徑關係圖中有兩個高點，而工蟻僅具有一個。另外，就抓附力道而言，兵蟻在每種粗糙度表面時，皆展現較高的最大靜摩擦力，有較強的附著力。

(二) 格斯特家白蟻

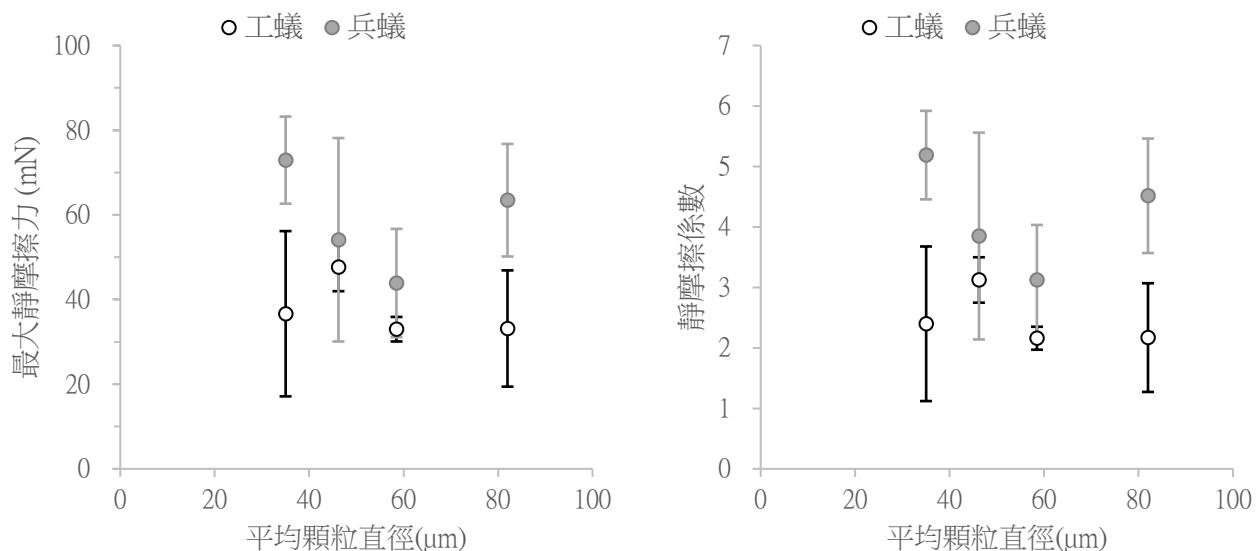


圖 22 格斯特家白蟻在不同粗糙度砂紙所受最大靜摩擦力、靜摩擦係數。(作者自行繪製)

格斯特家白蟻的工蟻在平均顆粒直徑為 $46.2\mu\text{m}$ 附近時，擁有較好的附著表現(47.7mN)。不過在平均顆粒直徑為 $35\mu\text{m}$ 、 $82\mu\text{m}$ 時，標準差過大，不確定白蟻是否會在平均顆粒直徑更小(低於 $46.2\mu\text{m}$ 時)，會有更好的附著表現。兵蟻在平均顆粒直徑大於 $82\mu\text{m}$ ($63.5\mu\text{m}$)與小於 $35\mu\text{m}$ ($72.9\mu\text{m}$)時，有更好的抓附表現，這可能代表此白蟻存在著適應不同粗糙表面的附著方式。與台灣家白蟻相同，兵蟻的摩擦力與顆粒直徑關係圖中有兩個高點，而工蟻僅具有一個，且兵蟻在大部分的表面所展現的附著力皆大於工蟻。

(三) 小象白蟻

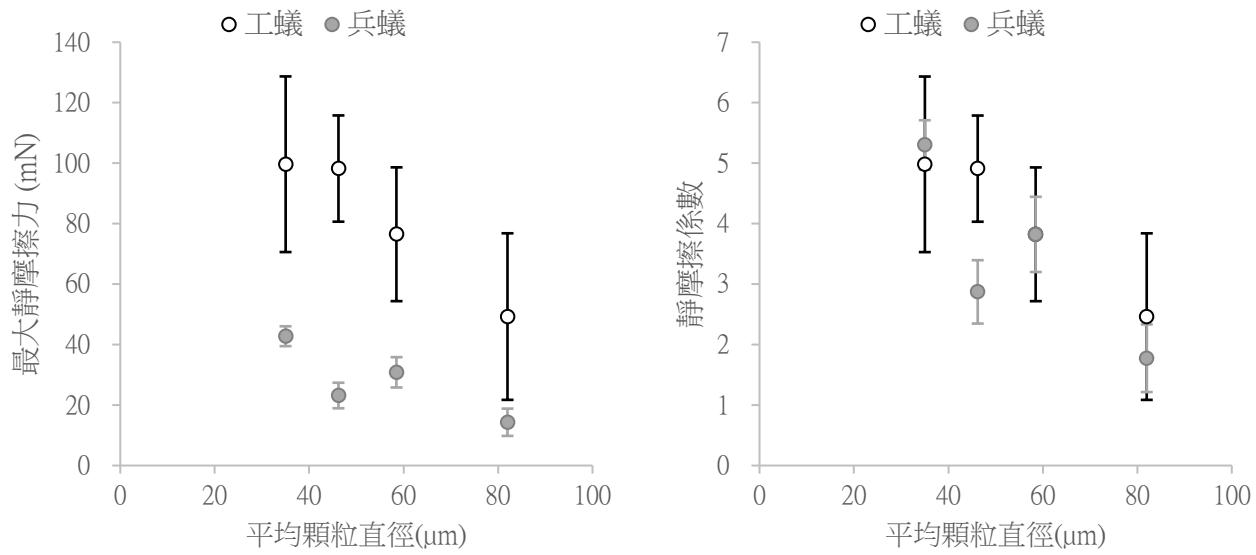


圖 23 小象白蟻在不同粗糙度砂紙所受最大靜摩擦力、靜摩擦係數。(作者自行繪製)

小象白蟻工蟻在砂紙顆粒越細時，能展現越好的抓附表現(46.2 μm : 98.2mN；35 μm : 99.6mN)，可能與小象白蟻的各構造(包含爪鉤)皆有較小的尺度有關係，故能抓附較細小的顆粒。小象白蟻兵蟻在平均顆粒直徑 35 μm 附近時，有更好的抓附表現(42.8mN)，第二個高點即為平均顆粒直徑 58.5 μm 附近時的附著表現(30.8mN)。結果顯示此白蟻較擅長抓附更細小的顆粒，確功能夠展現良好附著力的顆粒直徑需再往砂紙號數更大(表面顆粒更細緻)的樣本進行實驗。小象白蟻不同於前兩種家白蟻，小象白蟻工蟻在各粗糙表面時，均展現出優於兵蟻的抓附能力。唯一相同的地方，即為兵蟻能展現最佳附著表現的高點數量較工蟻多。

(四) 黃原鼻白蟻

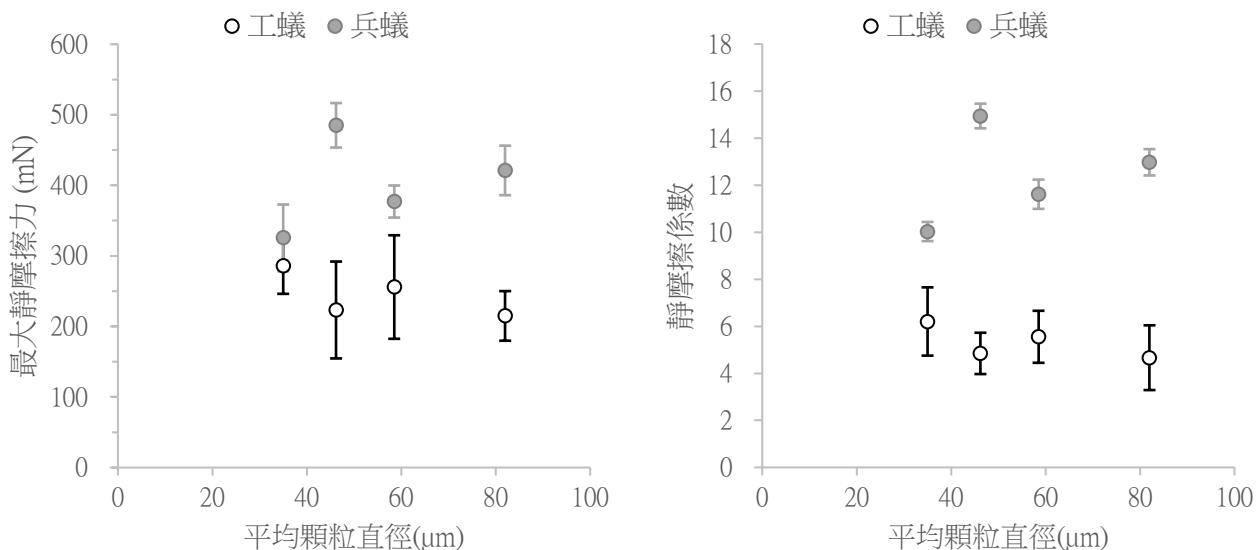


圖 24 黃原鼻白蟻在不同粗糙度砂紙所受最大靜摩擦力、靜摩擦係數。(作者自行繪製)

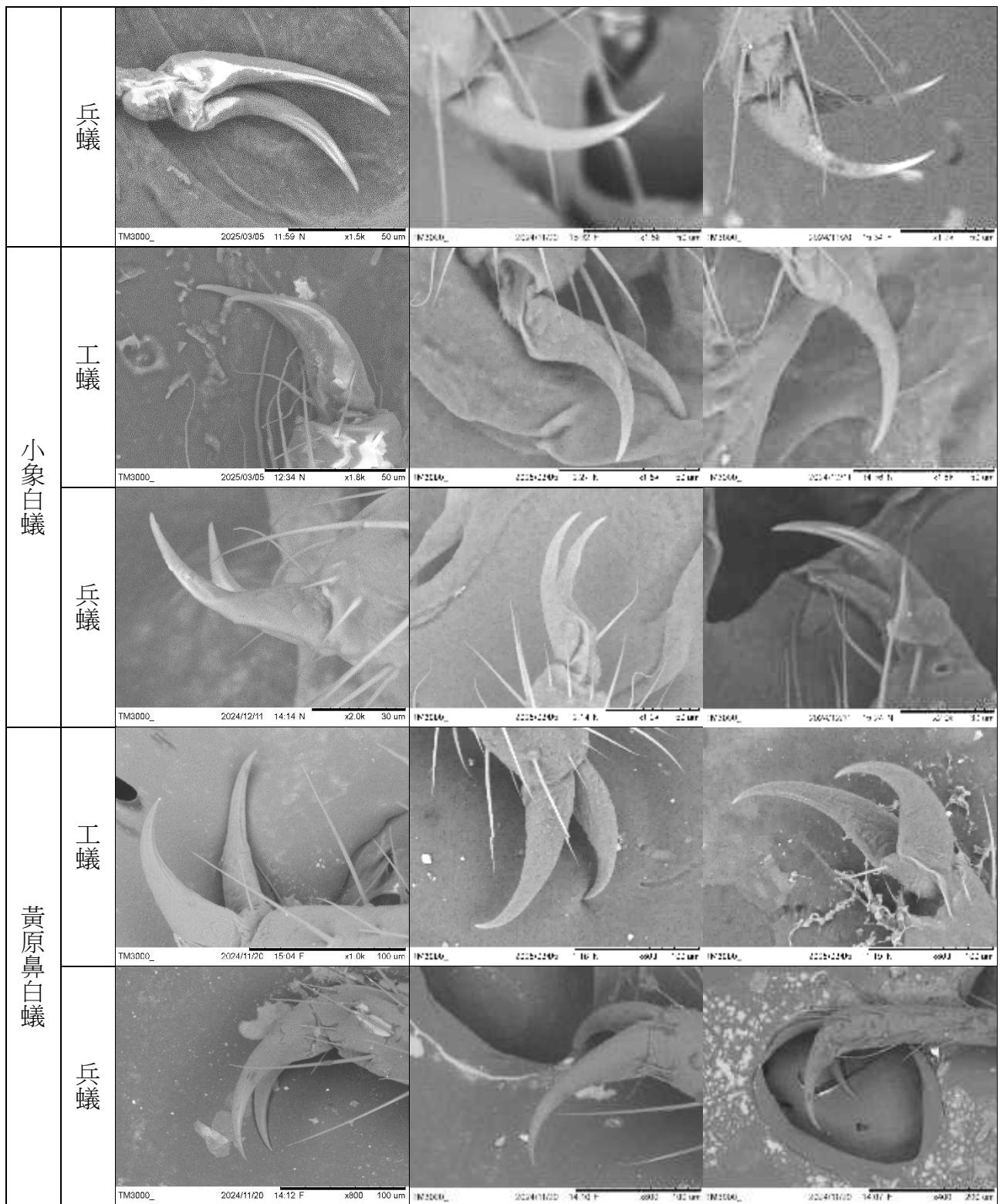
黃原鼻白蟻兵蟻在表面顆粒直徑 82 μm 與 46.2 μm 時有最佳的附著表現(82 μm : 421.1mN；46.2 μm : 485.0mN)，而工蟻在表面顆粒直徑 58.5 μm 與 35 μm 時有較好的附著表現(58.5 μm : 255.8mN；35 μm : 285.8mN)，可發現兵蟻能展現最佳附著表現的平均顆粒直徑大於工蟻。且比較工蟻與兵蟻的附著力，與台灣家白蟻、格斯特家白蟻相同，兵蟻附著力在各粗糙度時均大於工蟻。值得一提的是，黃原鼻白蟻的工蟻與兵蟻在附著力與表面顆粒的關係圖中，均具有兩個高點。

四、掃描式電子顯微鏡量測

(一) 掃描式電子顯微鏡影像紀錄

表 5 各物種/階級前、中、後足 ESEM 掃描結果。(皆為作者自行拍攝)

		前足	中足	後足
台灣家白蟻	工蟻			
	兵蟻			
格斯特家白蟻	工蟻			
	兵蟻			



(二) 爪鉤尺度量化

使用 ESEM 將白蟻其中一個爪鉤水平放置於視野，將所拍攝的影像，定義爪鉤兩尖端間的距離為爪長。

表 6 各物種/階級之爪長。(作者自行繪製)

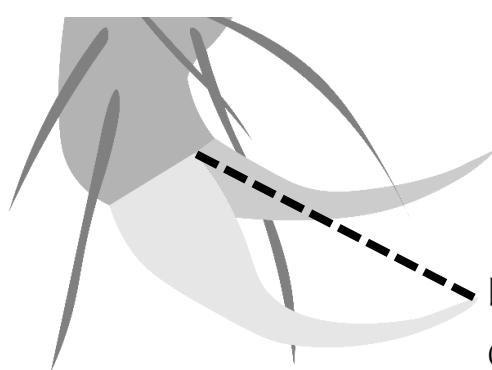


圖 25 圖中黑色虛線處即為計算爪鉤尺度所定義的爪長。
(作者自行繪製)

	台灣 家白蟻		格斯特 家白蟻		小象 白蟻		黃原鼻 白蟻	
	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻
爪長 (μm)	77.6	91.4	68.2	85.4	66.9	57.7	103.9	114.6

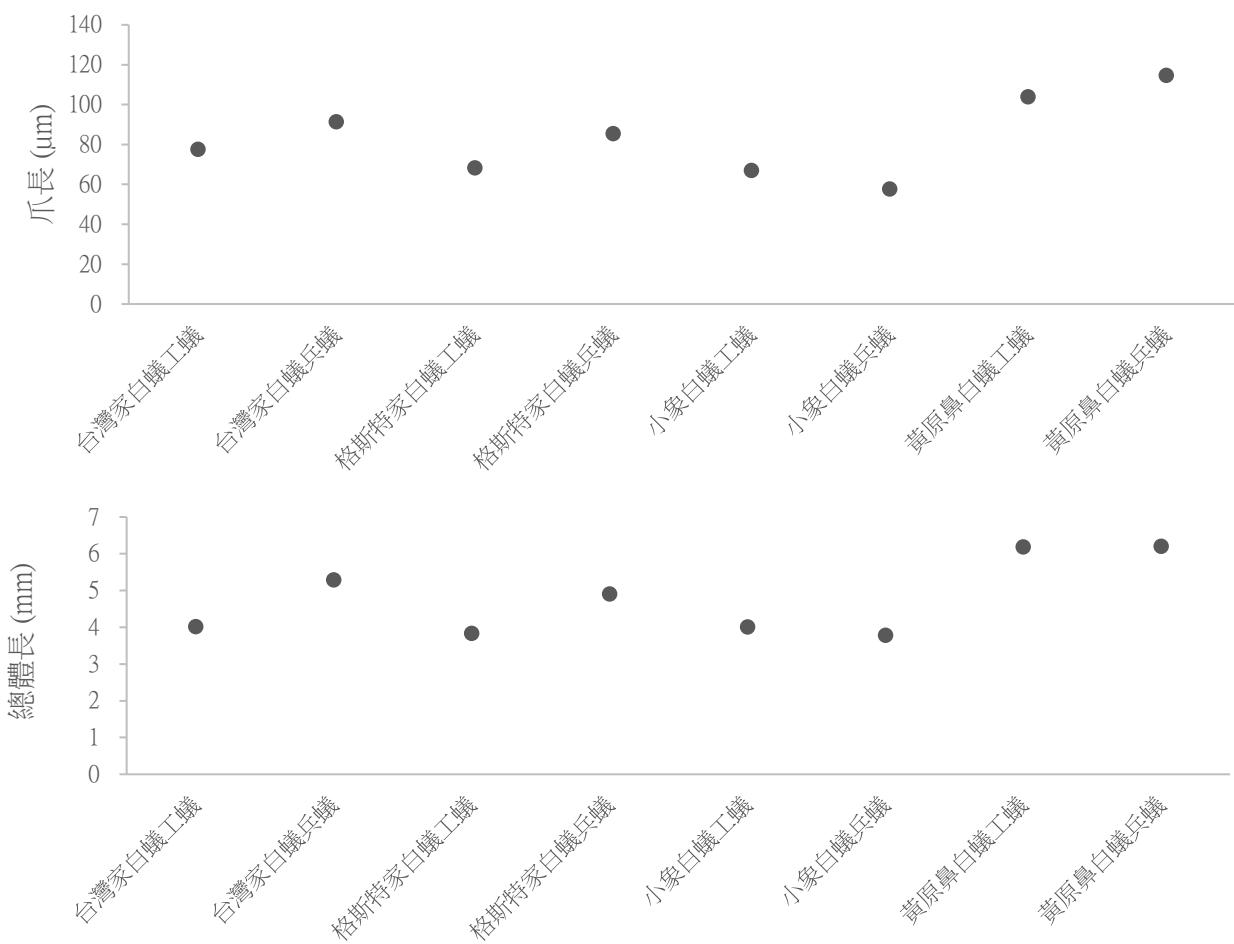


圖 26 各物種/階級之爪長與總體長比較圖。(作者自行繪製)

從爪長與體長的數據進行比對分析，可以發現兩者在各物種間的趨勢相同，顯示白蟻的爪鉤與體型有等比例縮放的關係，體型越大的白蟻爪鉤越大。

伍、討論

一、白蟻的附著形態

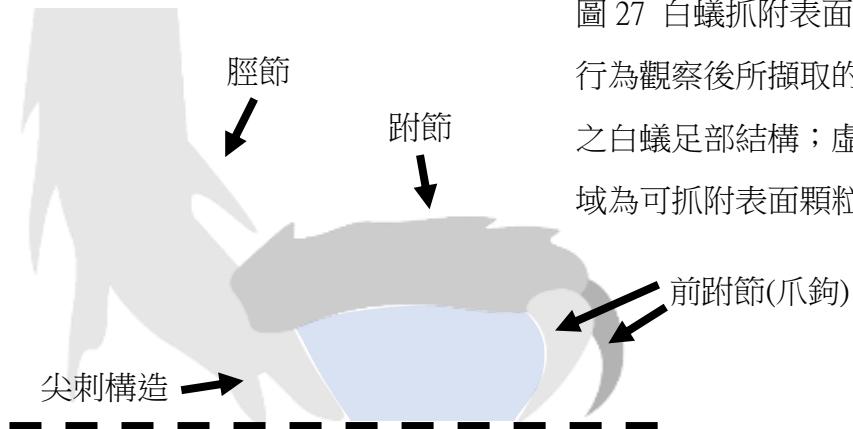


圖 27 白蟻抓附表面示意圖。灰色區域為活體行為觀察後所擷取的照片，藉由描圖，記錄下之白蟻足部結構；虛線代表接觸表面；藍色區域為可抓附表面顆粒範圍。(作者自行繪製)

經過活體行為觀察後，發現白蟻在附著於接觸表面時，脛節與跗節會形成夾角，由於脛節上具有結構堅硬的刺狀結構，會接觸到表面，進而影響跗節可以抬升的高度。因此，脛節、跗節、爪鉤三者所圍出的範圍也限制住了白蟻可抓附的最大顆粒直徑(圖 27)，大於此區域之顆粒，將無法表現出良好的附著力。

二、各物種間附著力與形態比較

在靜摩擦係數的比較中(圖 28B)，能發現黃原鼻白蟻明顯優於其餘物種，摩擦係數介於 6 至 16 之間，台灣家白蟻、格斯特家白蟻與小象白蟻的靜摩擦係數之間沒有顯著的差異，摩擦係數介於 1 至 6 之間。但是從最大靜摩擦力的數據(圖 28A)可發現，四物種間呈現明顯的附著力差異，顯示白蟻的附著力與質量有關係。

從圖 28 中可知，黃原鼻白蟻的附著力明顯高於其餘三個物種。且不論在何種情形，黃原鼻白蟻在形態、尺度與附著表現，均優於其餘物種。原因應為原鼻白蟻屬主要分布在海岸線，比起森林區域的物種有大量二維平面以棲息，原鼻白蟻屬競爭空間接近一維，狹窄許多，因此黃原鼻白蟻在打鬥的演化壓力較大，對力量需求較大。另外，因為地理分布的劣勢，使得黃原鼻白蟻發展出雙重擴散策略(dual-dispersal strategy)，包含有翅型擴散策略(alate-dispersal strategy)以及補充繁殖蟻擴散策略(neotenic-dispersal strategy)(Chiu, 2022)。此策略可以使黃原鼻白蟻擴散蟻巢，使群落結構更加壯大。若黃原鼻白蟻的巢穴較大，可能會有足夠的資源供應，使個體發育出較大的體型。進而具有更多的肌肉量，使得附著表現亦隨之增加。此外，黃原鼻白蟻工蟻的附著力甚至超過其餘物種的兵蟻。可能是黃原鼻白蟻工蟻不是最終型態，仍能蛻皮演變成兵蟻或繁殖蟻。由於工蟻具備高度的可塑性，使得附著的表現為最好。

將所有物種的附著力進行大致比較，由附著力高至低分別為黃原鼻白蟻、台灣家白蟻、格斯特家白蟻、小象白蟻，多受質量所影響。

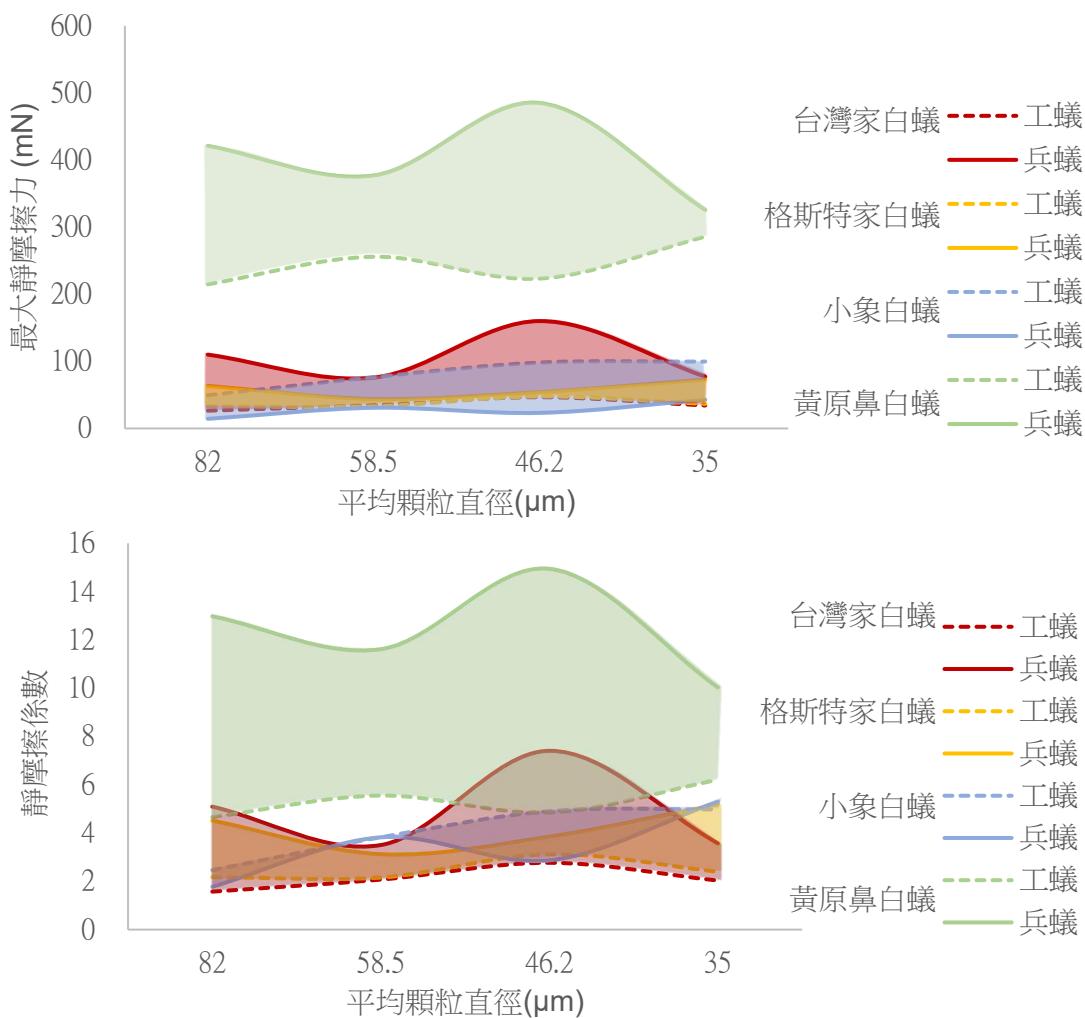


圖 28 各物種間最大靜摩擦力與靜摩擦係數的比較。(作者自行繪製)

三、附著力與爪鉤尺度的關係

根據 ESEM 所測量的爪鉤大小與附著力實驗的結果進行比較。發現白蟻能展現較好附著力的平均顆粒直徑與爪鉤的尺度有相關，而表面顆粒的高度更是影響白蟻附著力的關鍵。相同的表面顆粒大小中，若是脛節、跗節與爪鉤所形成的容納範圍大於表面顆粒，白蟻即能展現良好附著力；若是容納範圍小於表面顆粒，白蟻的附著表現將會較差。爪鉤較大的白蟻在顆粒較大時依然能展現良好附著力，反觀爪鉤較小的白蟻，在表面顆粒大時，附著表現將會驟降，無法有良好表現。因此爪鉤越大的白蟻，在顆粒直徑越大的表面上擁有較好的附著力，而有些也能在顆粒小時展現良好附著力，推測可能是因為二至三個小顆粒相加，也能符合脛節、跗節與爪鉤所形成的容納範圍。

表 7 各物種/階級爪鉤尺度與可表現最佳附著力之表面顆粒比較。爪鉤示意圖部分為根據行為觀察後確定跗節與爪鉤在運動狀態下的角度，並按照 ESEM 紀錄之爪鉤形狀所描繪；最後

一列的表面顆粒示意圖，是依據附著力實驗找出可以使白蟻表現最佳附著力的前兩個接觸表面顆粒。爪鉤示意圖之比例尺與表面顆粒示意圖相同。(作者自行繪製)

	台灣家白蟻		格斯特家白蟻		小象白蟻		黃原鼻白蟻	
	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻
爪鉤示意圖								
具之最佳附著表面顆粒	(46.2) 35	(46.2) 82	(46.2) 35	(35) 82	(35) 46.2	(35) 58.5	(35) 58.5	(46.2) 82

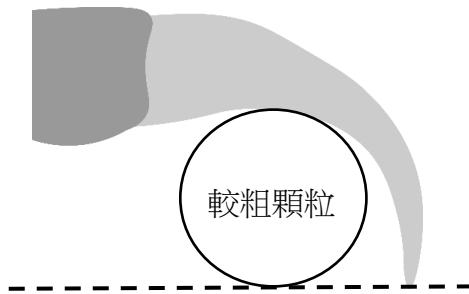
(單位： μm)

四、附著形態之探討

從表 7 中可知，白蟻能展現最佳附著力的表面顆粒不單只有一種，顯示白蟻在面對不同表面時，針對不同高度的表面顆粒，所對應的抓附方式與形態會有所不同。若是表面顆粒的直徑越大，使顆粒高度高於爪鉤可抬升的範圍，將會有較差的附著力。

另外，藉由活體行為觀察的結果也可發現，白蟻的爪鉤與跗節、胫節的角度在面對不同情況時，是會改變的。因此，同一個爪鉤在面對較細顆粒與較粗顆粒，足部末端會出現以下不同的形態：

(一) 面對較大顆粒



(二) 面對較小顆粒

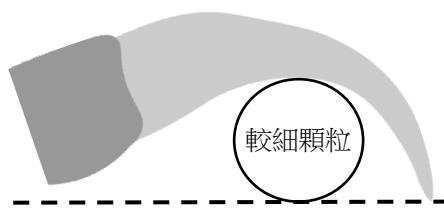


圖 29 白蟻面對不同顆粒大小時的抓附形態。灰色部分為白蟻跗節末端與爪鉤示意圖；圖中圓形為表面顆粒；虛線為接觸表面。(作者自行繪製)

藉由活體觀察、附著力實驗結果，以及自行描圖比較。可發現白蟻在面對不同粗糙度的表面時，呈現的足部形態會有所不同。在面對顆粒較大的表面時，白蟻的跗節會離地面較高；面對較顆粒較小的表面時，白蟻跗節則會接近地面。因此，也可以推測，跗節與爪鉤交界處若是碰觸到地表，此時爪鉤所形成的區域可容納之圓形，即為白蟻能展

現良好附著力的最小表面顆粒。若是顆粒更細，表面顆粒將無法與爪鉤進行接觸，使爪鉤扣住表面顆粒，此時將無法有良好的附著表現。

五、階級影響功能表現

(一) 附著力大小差異

在附著力實驗的結果(圖 28)中可以發現，除了小象白蟻外，其餘物種的兵蟻最大靜摩擦力皆大於工蟻。推測有以下原因：(1) 階級在族群中扮演之角色：工蟻在群體中的職責為育幼、築巢、清潔，不需要太大的力氣與附著需求；兵蟻則相反，最主要的任務即是保衛群體，因此面對外來生物的入侵，兵蟻必須在第一陣線以自身物理構造進行攻擊，對於力氣與肌肉量的需求非常大，故在附著力表現中展現其良好的體能。(2) 質量影響接觸壓力：在形態的數據中，大部分白蟻的兵蟻質量皆大於工蟻，在質量較大的情況下，對附著表面產生的壓力也越大，因此足部與地面的接觸將會更緊密，進而使附著力提升(Noirot, 1992)。

(二) 最佳附著表現範圍差異

從附著力實驗的結果，在圖 28 中針對工蟻與兵蟻各自所擬合的曲線進行比較，可發現兵蟻的曲線起伏較大(即高點數量較多)，反觀工蟻則較為平滑。因此，兵蟻在面對不同的粗糙表面時，可展現最佳附著表現的範圍與區間較多，顯示兵蟻不論是在較粗表面或是較細表面，皆能有良好的附著機制，因此推測除了爪鉤、跗節與表面的角度變化(圖 29)外，還存在著其餘能展現抓附表現多樣性的因素。反觀工蟻，能展現最佳附著表現的最佳平均顆粒直徑範圍較集中，通常只具有一個高點，顯示工蟻僅能在特定範圍表現最佳抓附力。

將上述結果與 ESEM 掃描照片的描圖結果(表 7)進行分析。能發現所有物種之工蟻的爪鉤形狀(圖 30A)皆是接近平滑的弧形，沒有太多的特殊結構與形狀。反觀可展現最佳附著表現的範圍與區間較多的兵蟻，其爪鉤形狀有較多的變異，在較靠近跗節與爪鉤交接處的爪鉤端，爪鉤上方會向外突出類似半圓結構(圖 30B)。推測由於此種構造上的差異，兵蟻抓附顆粒的有效面積及接觸點(圖 31)，較工蟻多，使兵蟻可展現良好附著力的區間較多。

推測可能使兵蟻在較多區間擁有最佳附著表現的原因，可能是兵蟻負責保衛群體，有經常脫離蟻巢向外地入侵，以及對抗不同外來種與入侵者的需求，因此需要

擁有着善於應對各種粗糙表面的能力，且在進行攻擊時，對於表面也需要良好的抓附力以穩固自身。因此，造成兵蟻在不同尺度的粗糙度下，皆能展現良好附著能力。反觀工蟻，其主要對於族群的功能即為育幼、築巢，因此沒有過多需要離開巢體、前往其餘微棲地的需求，使得能夠展現良好附著力的顆粒範圍集中在特定區間，而此區間也常與微棲地的顆粒大小相符合。

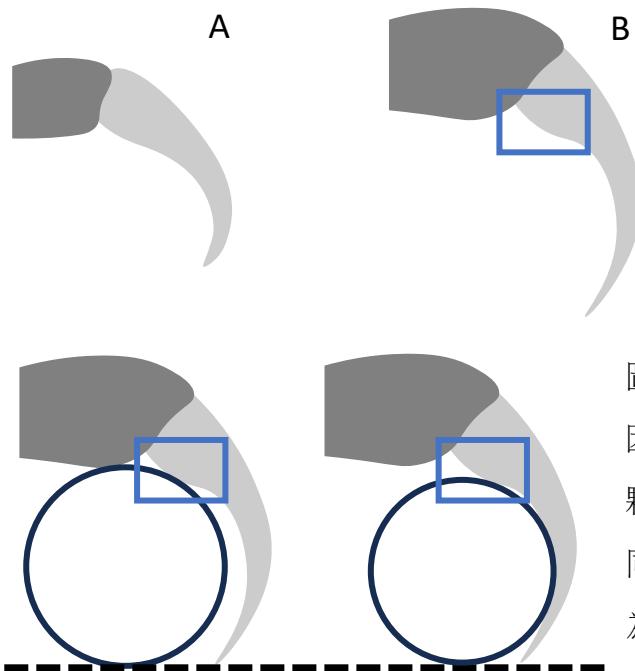


圖 30 不同階級白蟻爪鉤形狀比較(以格斯特家白蟻為例)。圖 30A 為工蟻爪鉤；圖 30B 為兵蟻爪鉤，藍色方框所指即為向外突出之半圓構造。(作者自行繪製)

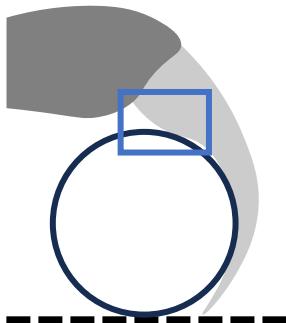


圖 31 兵蟻爪鉤面對不同顆粒的抓附形態。因具有突出構造，使兵蟻能良好抓附不同顆粒，圖中模擬兵蟻在爪鉤與表面夾角相同時，爪鉤與不同顆粒的關係。虛線部分為接觸表面。(作者自行繪製)

六、附著力與微棲地間的關係

分析不同白蟻樣本所處的微棲地，台灣家白蟻、格斯特家白蟻與黃原鼻白蟻皆處於濕度較高的土壤和木頭混合處，保存於陰暗潮濕的密封塑膠盒中，小象白蟻則偏好在較為乾燥的通風鬆土區(圖 5)。其中，台灣家白蟻居住的木頭與濕土混合結構較堅硬、細緻且均勻，表面光滑而無顆粒感，水分需要一段時間才能從表面吸收；格斯特家白蟻居住的木頭與濕土，土壤顆粒細小鬆軟，具有縫隙能夠迅速吸收水分；小象白蟻喜居於乾燥的木板與鬆土之間，常被發現活動於木板下方；黃原鼻白蟻居住在顆粒較粗大的土塊中，結構緻密，具有一定的硬度，顆粒間的黏結性較強(表 8)。

將附著力實驗的結果(圖 21 至圖 24)與白蟻所處微棲地進行比較。發現台灣家白蟻與格斯特家白蟻皆居住於顆粒較細緻的濕土中，因此可以展現良好附著力的顆粒相對較小。而小象白蟻能表現最佳附著力的表面顆粒為所有物種中最小的，推測除了本身體長與質量皆為較小外，活動範圍經常在木板(表面粗糙度較小)也是其中一個原因。反觀黃原鼻白蟻，他居住於顆粒較大的堅硬泥塊中，因此對應到的能夠展現最佳附著力時的平均顆粒直徑較大。因此，此實驗結果可解釋各白蟻附著表現與所處微棲地間的關係。

表 8 各物種白蟻所處微棲地。(作者自行拍攝)

白蟻物種	台灣家白蟻	格斯特家白蟻	小象白蟻	黃原鼻白蟻
蟻巢 (微棲地)				
微棲地 放大圖				

七、其餘可能影響白蟻附著力之因素

(一) 足部肌肉量：在實驗時抓取台灣家白蟻、格斯特家白蟻、小象白蟻時，三物種均能使用軟鑷輕易地使其脫離實驗用砂紙，有時只要傾斜砂紙，白蟻亦能脫落。但是抓取黃原鼻白蟻的工蟻與兵蟻時，將其向上脫離水平的砂紙，就能感受到強大的抵抗力，儘管頭胸腹已明顯離開原始位置，但是六肢的爪鉤仍會堅固地附著於砂紙上。顯示足部肌肉量對於白蟻附著砂紙有明顯的影響。

(二) 白蟻反應力：在進行白蟻實驗前，曾用螞蟻進行附著力實驗的模擬。比較白蟻與螞蟻的反應力與敏捷度，會發現螞蟻皆略勝一籌。相反的，白蟻在實驗時的反應皆會比較遲鈍(而實驗樣本中，又以黃原鼻白蟻的敏捷度為最高)，例如：遭到軟鑷夾附時，白蟻不會做出抵抗的行為，須過一段時間才有稍微明顯的表現。這些狀況可能導致在附著力實驗轉盤開始旋轉時，白蟻未注意到周遭表面的變化，因而表現不出最佳抓附能力。

八、導致數據誤差之原因

(一) 利用 Tracker 測量時，由於整個實驗的尺度很小，故比例尺差一點便會造成改變。
(二) 天氣(溫度、濕度)與光線皆會影響白蟻的活動力，導致白蟻在不同時間、地點做實驗皆會有所差異。

九、未來展望

(一) 找更多號數的砂紙，找出能使白蟻表現最佳抓附能力的粗糙表面。
(二) 設計裝置以量化白蟻附著時爪鉤與表面的夾角。

(三) 針對白蟻足部肌肉量、爪鉤材質與成分進行更深入的探討。

(四) 製作出白蟻足部附著於不同表面之立體模型。

(五) 除了白蟻外，針對小型昆蟲之爪的運用機制做出歸納。

十、應用

(一) 應用於白蟻防治，製作能夠不使白蟻附著與爬行的簡易材料。

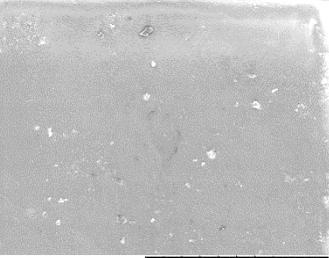
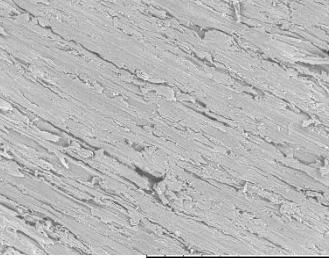
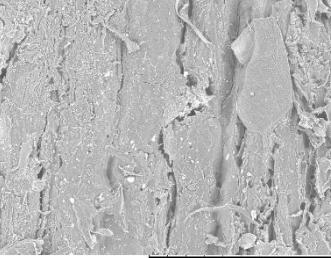
(二) 利用小型昆蟲之爪鉤原理製作類似魔鬼氈、附著材料。

(三) 利用附著力實驗之結果找尋不易使白蟻攀附的建材。

將實驗砂紙放入 ESEM 掃描表面輪廓，尋找常見建材並切割表層進行 ESEM 掃描。利用 Tracker 計算表面顆粒或纖維的短徑，找出與計算結果相似的砂紙號數。

由於建材中最常受白蟻侵蝕的地方為牆壁或隔間，因此向裝潢師傅查詢夾板型錄，並詢問較受大眾喜愛、常見的隔板型號以進行 ESEM 掃描。市面上、居家常見隔板分為人造科技木與真木兩種，其中較受歡迎的白橡科技木表面平整幾乎無纖維與起伏，粗糙程度小於號數 400 的砂紙；而真木中取樣了藉由加工以增加耐久性的碳化夾板與原木的落葉松夾板，可發現落葉松夾板的纖維、裂痕明顯較粗。

表 9 常見建材 ESEM 掃描結果。(作者自行拍攝)

建材名稱	人造白橡科技木	碳化夾板	落葉松夾板
ESEM 掃描結果			

十一、結論

一、適合量測小型昆蟲附著力之裝置

白蟻的附著力在粗糙表面(實驗用之特定砂紙號數)時，垂直放置接觸表面並無法使白蟻脫落，由於離心轉盤可任意調整旋轉半徑與轉速，增大向心力，故需藉由離心轉盤轉出自白蟻，以得到正確的摩擦係數。

二、形態分析與行為觀測

(一) 在實驗使用之白蟻中，以黃原鼻白蟻的體型與質量最大。

(二) 因為具有大顎，幾乎所有白蟻之兵蟻的體型皆大於工蟻，而小象白蟻的兵蟻體型卻小於工蟻。原因推測為小象白蟻之兵蟻的大顎退化為管狀構造，僅會分泌化學物質，不具有鉗咬型大顎般夾咬敵人等物理性的防禦作用。

(三) 白蟻展現最佳附著力時，足部的脛節與跗節會形成夾角，因脛節上具有結構堅硬的刺狀結構，會影響跗節可以抬升的高度，進而決定可以容納表面顆粒的範圍。

三、附著力實驗

(一) 除了小象白蟻，其餘白蟻之兵蟻的抓附能力均大於工蟻。應與兵蟻負責抵抗外來者入侵，擁有較高的肌肉量，以及質量較高對表面所造成的壓力較大有關。

(二) 質量與體長均最大的黃原鼻白蟻，其附著力皆明顯大於其餘物種。導致此現象的原因可能為：(1) 黃原鼻白蟻的打鬥演化壓力較大；(2) 原鼻白蟻屬居住在海岸線接近一維的狹窄；(3)白蟻具有雙重擴散策略；(4) 工蟻不是最終型態，有較高的可塑性以演化為其他階級。

(三) 小象白蟻兵蟻的質量與體長，均顯著小於其餘白蟻物種，而附著表現也最差。

(四) 相較於工蟻，兵蟻可展現良好附著力的表面顆粒範圍較多。

四、ESEM 掃描

(一) 白蟻的爪鉤尺度與體長的關係，有等比例放大的趨勢。

(二) 兵蟻在靠近跗節與爪鉤交接處的爪鉤端，會向外突出半圓結構。使兵蟻抓附顆粒的有效面積及接觸點較多，在附著力實驗中有較多可展現良好附著表現的區間。

五、附著力與功能形態、微棲地的關係

(一) 能使白蟻展現良好附著力的表面顆粒大小，與白蟻之爪鉤尺度有關，若顆粒大於爪長，白蟻附著力即變差；顆粒過小，則無法與爪鉤接觸，附著能力同樣不好。

(二) 白蟻在面對不同表面顆粒時，會改變爪鉤與跗節的角度以抓附顆粒。同時，也從角度的極限決定了可抓附的最大與最小顆粒。

(三) 可使白蟻展現良好附著力的顆粒大小，與微棲地中土壤顆粒或木板粗糙度有關。

柒、參考文獻資料

- 一、Chen, G. Y. (2022). Hybridization between Formosan subterranean termite and Asian subterranean termite in Taiwan (Doctoral dissertation, MSc dissertation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan).
- 二、Chen, Y. F., & Hsu, F. C., & Lin, C. C. (2020). Effects of elevations and vegetation types on the ground-dwelling ant community structures.
- 三、Chiu, C. I. (2014). Structures and functions of subterranean gallery systems of two soil-feeding termites (Doctoral dissertation, MS thesis, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan).
- 四、Chiu, C. I. (n.d.). 台灣原鼻白蟻補充繁殖蟻. 台灣生命大百科.
- 五、Chiu, Y. N. (2022). The caste development, dual-dispersal strategies and colony reproductive structure of

【評語】052001

這項研究綜合了白蟻附著力的多重觀察角度，包括形態學分析、附著力實驗、電子顯微鏡影像和行為觀察，展現了相當全面的實驗設計。然而，仍有一些不足之處值得討論與改進。

首先，實驗中主要使用砂紙表面來模擬不同粗糙度，但這與白蟻自然棲息環境中的微結構存在差異。砂紙的材質較為單一，無法完全覆蓋真實世界中的微棲地多樣性。如果能將實驗範圍擴展至模擬更為複雜的建材結構，如木材、牆面等，將能更具實際應用價值，尤其是對白蟻防治技術的改進。

其次，研究雖然提供了標準差和 t 檢定結果，但若能增加更多重複次數並進行更為細緻的統計分析，將能使結論更加堅實，並提高結果的說服力。此外，白蟻的性別和年齡等變量是否有標準化控制，以及不同齡期體重差異對附著力的影響未有足夠討論。這些變數可能在實驗中產生影響，需進一步澄清。

另一個需要注意的問題是，摩擦係數的數據變異性較大，且未明確闡述數據排除標準。這可能導致結果的偏差，因此應進一步明確排除標準與濾除標準的具體方法，以增強數據的可靠性和

重複性。特別是在處理異常數據時，若能提供具體的判斷標準，將避免主觀判斷所帶來的偏差。

研究中雖然提出了利用離心轉盤模擬白蟻的附著行為，但這一“被迫掉落”的情境與自然環境中的白蟻運動存在差異，這可能使得模擬的結果與實際行為有所偏離。若能將這一實驗結果與野外實際觀察進行對比，將能更真實地反映白蟻的運動與附著行為，從而提升研究的應用價值。

總體而言，這項研究提供了有價值的基礎資料，尤其在生物力學和白蟻防治材料的開發方面具有潛力。然而，仍有一些細節需要進一步完善，如實驗設計的複雜度、數據處理標準和方法的創新等。若能針對這些問題進行改善，將能提高研究的說服力，並使其在白蟻防治及相關領域中發揮更大作用。

作品海報

白蟻在不同粗糙表面的抓附比較

摘要

昆蟲附著力學中，常用爪與爪間體進行分析。為了解爪鉤附著時的功能，故選用普遍不具爪間體的白蟻單純對爪鉤進行探討。另外，白蟻是常見居家害蟲，會侵蝕建材並危害建築，但白蟻的抓附能力與偏好至今仍未被研究。因此，希望能量化白蟻的附著力，並尋找不使白蟻攀附的材料，減少對建築的危害。本研究以常見居家白蟻為對象，首先實施形態觀察，再以自製離心轉盤對抓附能力進行量化，最後使用掃描式電子顯微鏡對爪鉤構造進行分析。發現使白蟻展現最佳附著力的表面顆粒，會受脛節、跗節、爪鉤構成之範圍影響，並且和白蟻爪鉤尺度、附著形態、微棲地皆有關係。此外，從附著力最突出的黃原鼻白蟻得知，打鬥與演化壓力、工蟻可塑性皆會影響附著表現。

研究目的

欲了解白蟻附著偏好與表現，希望能使用力學測

試、形態量測與分析，得到以下目的：

- 一、找出可以量化白蟻附著力的方法與裝置
- 二、了解不同物種白蟻的爪鉤大小，以及附著於粗糙表面時的足部末端形態
- 三、比較各白蟻物種間的抓附能力
- 四、探討足部結構、階級分工、演化壓力、微棲地對於白蟻附著能力的影響

研究架構

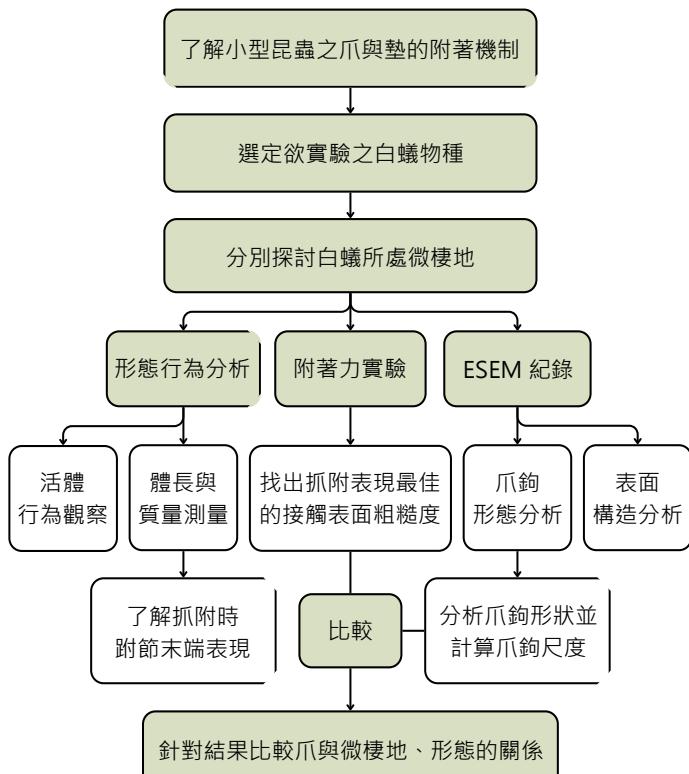


圖 研究架構與流程 【圖片為作者自行繪製】

研究過程與方法

實驗白蟻物種：

- 台灣家白蟻 (*Coptotermes formosanus*)
- 格斯特家白蟻 (*Coptotermes gestroi*)
- 小象白蟻 (*Nasutitermes parvonasutus*)
- 黃原鼻白蟻 (*Prorhinotermes flavus*)

一、白蟻的形態與行為分析

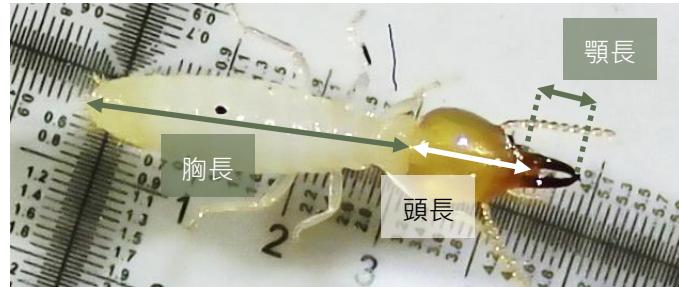


圖 定義白蟻之顎、頭、胸長 【影像為作者自行拍攝】

二、探討白蟻的附著力

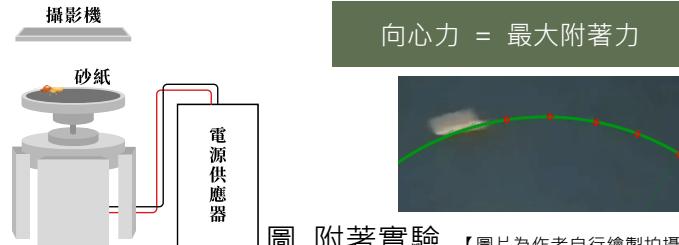


圖 附著實驗 【圖片為作者自行繪製拍攝】

三、ESEM 掃描

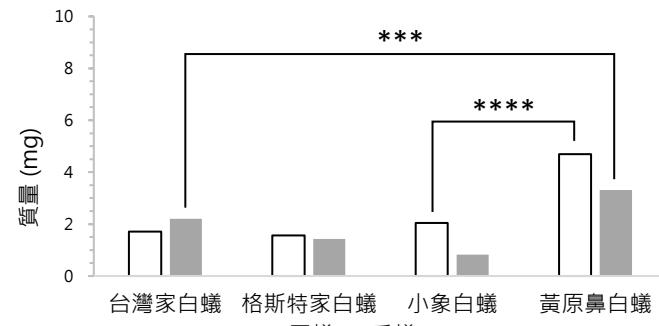


圖 ESEM 掃描示意圖 【影像為作者自行拍攝】

研究結果

一、白蟻的形態與行為分析 (**表示 t-test 統計結果為 p 值 ≤ 0.001 ; ****表示 t-test 統計結果為 p 值 ≤ 0.0001)

(一) 各物種/階級間質量比較 【圖片為作者自行繪製】



(三) 活體行為觀察 【影像為作者自行拍攝】

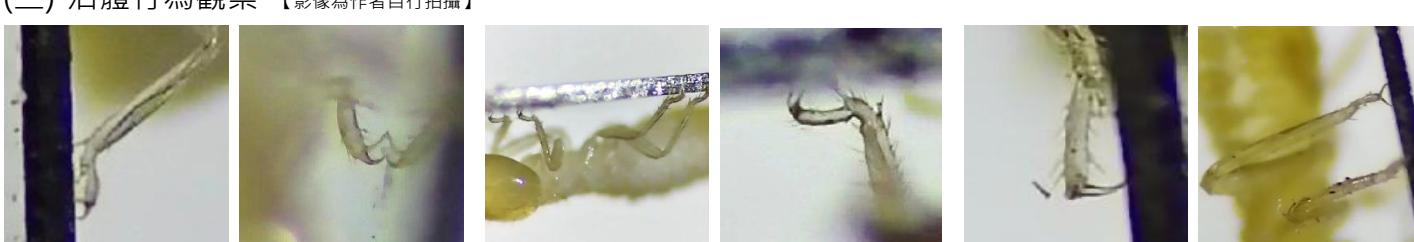
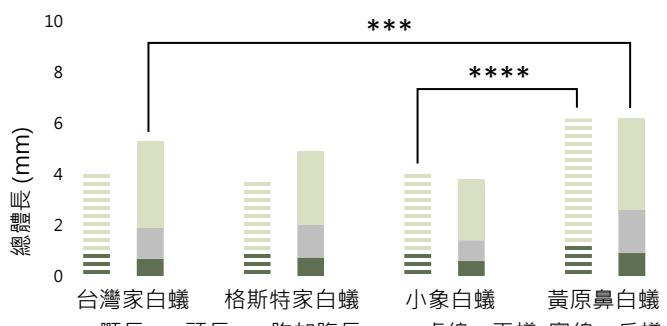


圖 台灣家白蟻兵蟻

圖 格斯特家白蟻兵蟻

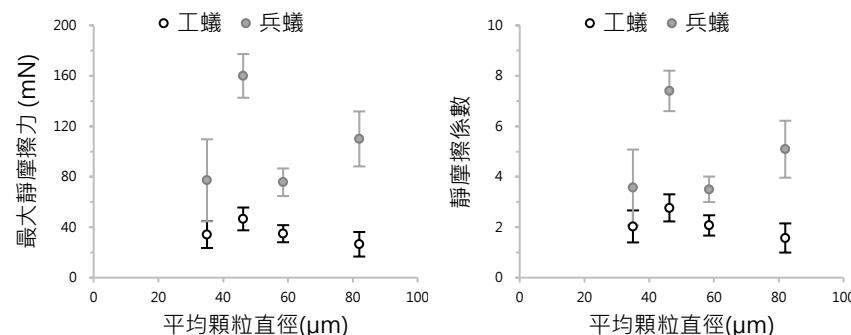
圖 黃原鼻白蟻(左)與兵蟻(右)

(二) 各物種之顎、頭、胸長比較 【圖片為作者自行繪製】



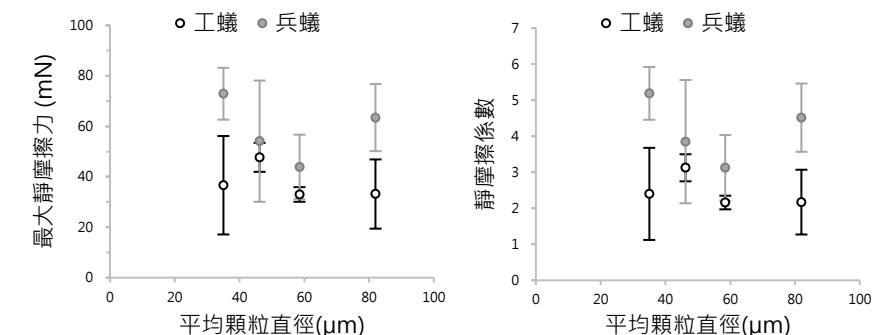
二、探討白蟻的附著力 【圖片為作者自行繪製】

(一) 台灣家白蟻

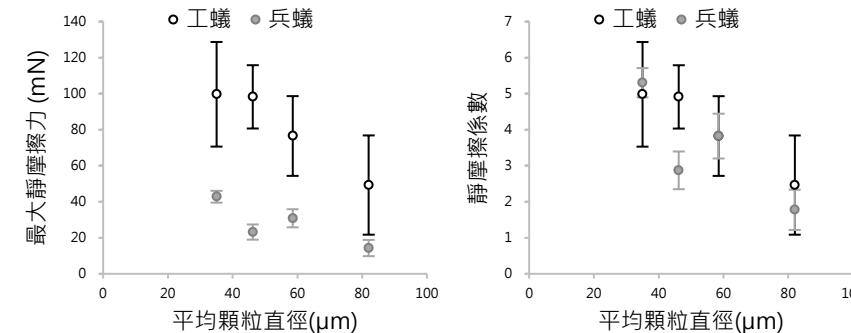


(二) 格斯特家白蟻

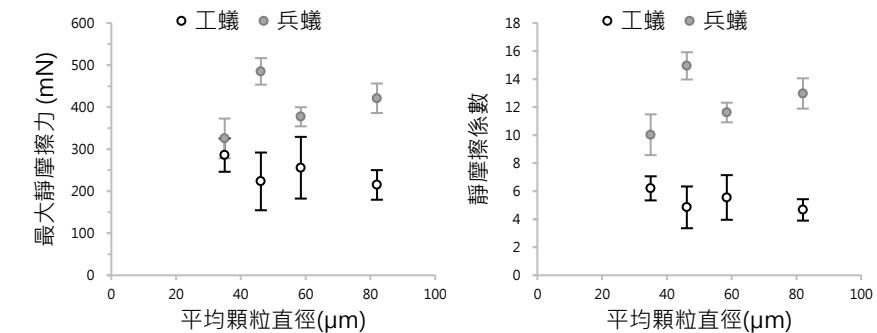
(二) 格斯特家白蟻



(三) 小象白蟻

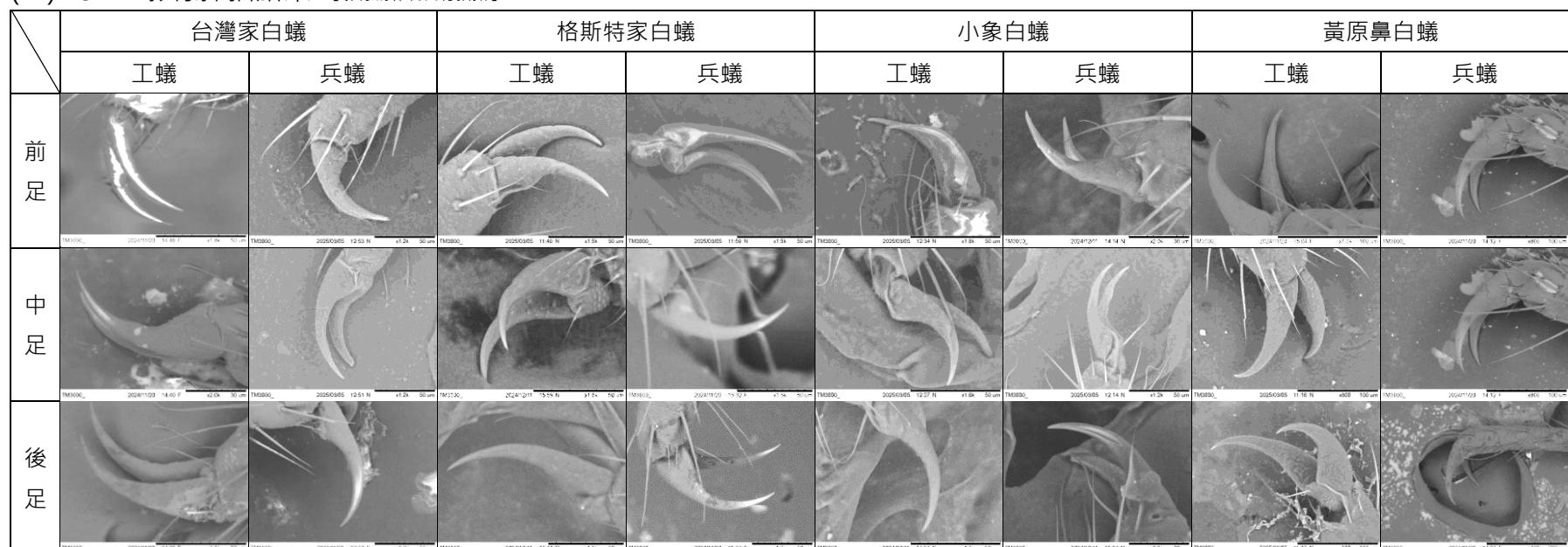


(四) 黃原鼻白蟻



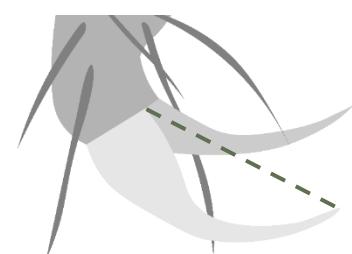
三、ESEM 掃描

(一) ESEM 影像掃描結果 【影像為作者自行拍攝】



(二) 爪鉤尺度量化

使用 ESEM 將白蟻其中一個爪鉤水平放置於視野，將所拍攝的影像，定義爪鉤兩尖端間的距離為爪長。

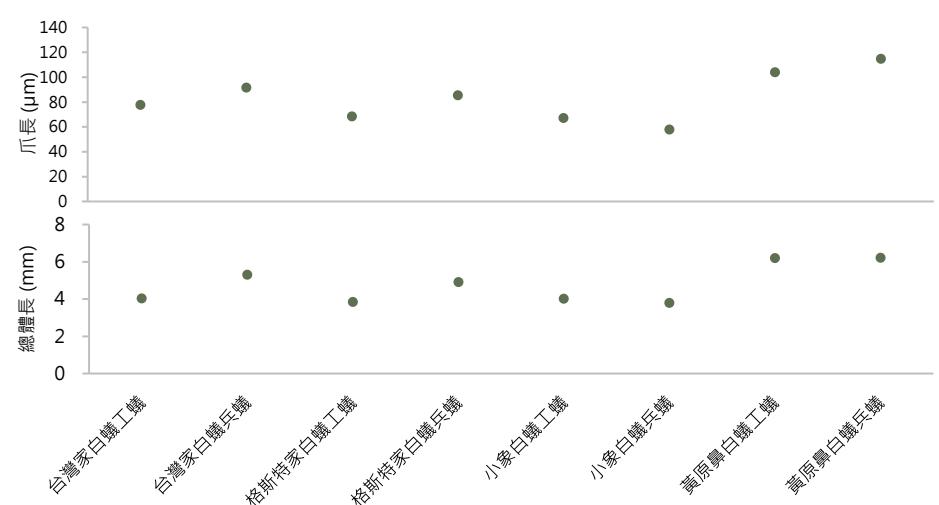


左圖 爪長定義【圖片為作者自行繪製】

右圖 爪長與總體長比較

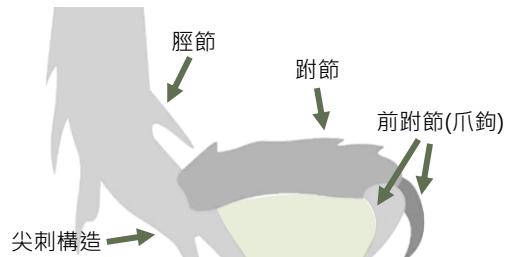
【圖片為作者自行繪製】

結果顯示白蟻的爪鉤與體型有等比例縮放的關係。



討論

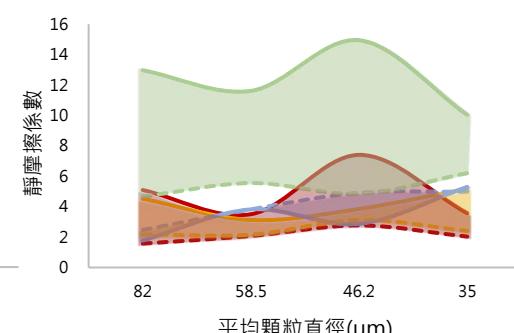
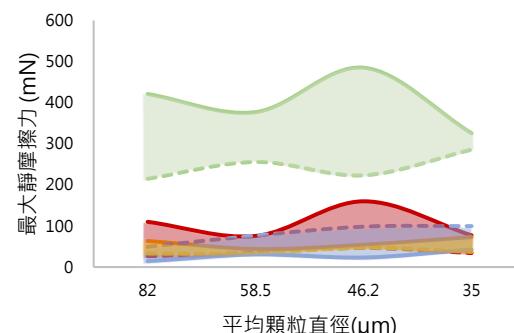
一、白蟻附著形態



經過活體行為觀察後，發現白蟻在附著於接觸表面時，胫節與跗節會形成夾角，由於胫節上具有結構堅硬的刺狀結構，會接觸到表面，進而影響跗節可以抬升的高度。因此，胫節、跗節、爪鉤三者所圍出的範圍也限制住了白蟻可抓附的最大顆粒直徑，大於此區域之顆粒，將無法表現出良好的附著力。

圖 白蟻抓附表面示意圖 【圖片為作者自行繪製】

二、各物種間附著力比較 【圖片為作者自行繪製】



台灣家白蟻
格斯特家白蟻
小象白蟻
黃原鼻白蟻

黃原鼻白蟻之附著優勢
1.打鬥與演化壓力
2.工蟻可塑性
3.雙重擴散策略
(dual-dispersal strategy)

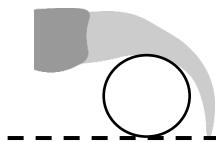
三、附著表現與爪鉤尺度的關係 【圖片為作者自行繪製】

(單位 : μm)

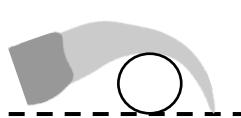
	台灣家白蟻		格斯特家白蟻		小象白蟻		黃原鼻白蟻	
	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻	工蟻	兵蟻
爪鉤示意圖								
具最佳附著之表面顆粒	46.2 35	46.2 82	46.2 35	35 82	35 46.2	35 58.5	35 58.5	46.2 82

四、附著形態之探討 【圖片為作者自行繪製】

(一) 面對較粗顆粒



(二) 面對較細顆粒



五、階級影響功能表現

(一) 附著力大小差異

從附著力實驗可知，兵蟻最大靜摩擦力大於工蟻

推測可能原因如下：

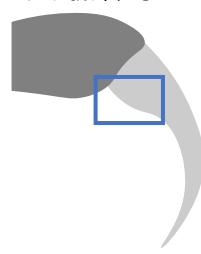
1. 階級在族群中扮演之角色
2. 質量影響接觸壓力

(二) 最佳附著表現範圍差異 【圖片為作者自行繪製】

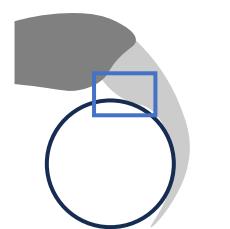
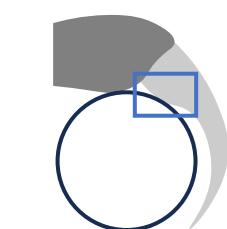
1. 工蟻爪鉤



2. 兵蟻爪鉤



兵蟻爪鉤面對不同大小顆粒的抓附形態：



一、爪鉤大小與附著時的足部末端形態

1. 白蟻的爪鉤尺度與體長的關係，有等比例放大的趨勢。
2. 白蟻展現最佳附著力時，胫節與跗節、爪鉤決定了可以容納表面顆粒的範圍。且會改變爪鉤與跗節的角度以抓附顆粒，角度的極限決定了可抓附的最大與最小顆粒。

二、各白蟻物種間的抓附能力

兵蟻普遍比工蟻具有較好的附著力；質量與體型最小的小象白蟻，附著表現最差。

三、功能形態、階級分工、演化壓力、微棲地對於白蟻附著能力的影響

1. 多數兵蟻抓附能力大於工蟻。與兵蟻負責抵禦外來者，及質量對表面所造成的壓力較大有關。
2. 兵蟻在靠近跗節與爪鉤交接處的爪鉤端，會向外突出半圓結構。使抓附顆粒的有效面積及接觸點較多，在附著力實驗中有較多可展現良好附著表現的區間。
3. 可使白蟻展現良好附著力的顆粒大小，與微棲地中土壤顆粒或木板粗糙度有關。
4. 黃原鼻白蟻附著力大於其餘物種，原因可能為：(1) 黃原鼻白蟻的打鬥演化壓力較大；(2) 原鼻白蟻屬居住的海岸線較狹窄；(3)具有雙重擴散策略；(4) 工蟻不是最終型態，有較高的可塑性。

主要參考資料

- Croslan, M. W. J., Su, N. Y., & Scheffrahn, R. H. (2005). Arolia in termites (Isoptera): functional significance and evolutionary loss. *Insectes sociaux*, 52, 63-66.
- Traniello, J. F., & Leuthold, R. H. (2000). Behavior and ecology of foraging in termites. *Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology*, 141-168.
- Tsai, Y. C. (2014). Biomechanics of Surface-Dependent Attachment in Arboreal and Ground Dwelling Ants (Institute of Biophysics, National Chung Hsing University).
- Yang, R. L., & Li, H. F. (2012). Taxonomy and identification of the five common termite species in Taiwan. *Formosan Entomology*, 32, 169.
- Noirot, C. (1992). *From solitary to social: evolution of insect sociality*. Ethology Ecology & Evolution.