

綠意下的危機：都市南洋杉白蟻的危害診斷與管理

文／林振榮[1*]、彭炳勳[1]、林柏亨[1]
圖／林振榮 、陳柏豪



圖 1　受白蟻咬食侵擾而受損的肯氏南洋杉（No.36）的橫切面可見光照片

[1] 林業試驗所林產利用組
[*] 通訊作者（zzlin@tfri.gov.tw）

在臺北這座現代化都市中，挺拔的肯氏南洋杉（*Araucaria cunninghamii* Mudie）常以傲然身姿點綴著校園與街道，是都市生態系統（urban ecosystems）中不可或缺的綠色支柱。然而，這些看似堅韌的林木內部，可能正悄悄上演著一場肉眼無法察覺的掏空危機。以2022年國立臺灣師範大學公館校區發生的肯氏南洋杉無預警倒伏事件為例，事後現勘發現其樹幹內部早已被白蟻啃食殆盡，僅剩一層薄薄的樹皮外層勉力支撐。這起事件成為都市林木風險管理（risk management）技術升級的關鍵指標，顯示過去單純依賴目視評估（Visual Tree Assessment, VTA）的定性巡檢，已不足以有效預警此類隱形結構威脅。為了建立更科學的預警機制，研究導入應力波二維影像技術（stress wave 2D imaging technology），針對受害林木進行為期一年的追蹤監測，期盼透過科技之眼，為管理單位提供精準的減災依據。

臺灣家白蟻的入侵與危害特性

為了釐清白蟻的危害軌跡，研究針對倒伏樹木周邊的六棵肯氏南洋杉進行精密監測，以生長錐鑽孔及內視鏡調查確認這場危害樹木的主角為臺灣家白蟻（*Coptotermes formosanus* Shiraki）。地下白蟻（Subterranean termites）以木材中的纖維素（cellulose）為主食，且特別偏好從活體樹幹內部開始咬食。透過長期的時空追蹤觀察，發現白蟻入侵活體林木展現了驚人的立體空間策略，主要可歸納為地底入侵與空中落樹兩大途徑。

在地下入侵模式中，白蟻群體以土壤中的巢穴為根據地，經由地表與樹木基部接觸的根頸區域，築造隱蔽的泥管向上蔓延。受測南洋杉中有半數呈現這種典型模式，其結構損傷均由樹幹基部內部開始，隨時間逐月向上擴張。相反地，空中落樹模式則發生在每年春夏之交的分飛季節，有翅生殖個體（alates，即飛蟻）受到都市燈光吸引而大量群聚，並直接降落於樹幹中高處因外力留下的傷口或裂縫中定居建巢。研究發現部分南洋杉的初步損傷點異常出現在離地一公尺以上的高處，並呈現由上向下發展的擴散特徵，證實了白蟻的攻擊具有立體多維的空間特性。

分析南洋杉內部的危害現場可以發現，臺灣家白蟻在木材組織內的啃食表現出高度規律的物理特異性。在微觀結構上，牠們採取「先軟後硬」的層次取食策略，優先取食材質密度較低、管胞管壁較薄且鬆軟的早材

（earlywood），隨後才緩慢處理、啃食材質緻密且堅硬的晚材（latewood）。這種具選擇性的啃食方式，使得木材在初期看似結構完整，實則內部結構韌性已大幅降低。

在空間擴張的路徑上，白蟻的取食活動通常從活木（living trees）或立木（standing trees）缺乏活細胞的心材（heartwood）核心區域開始。其空間擴散順序表現出明確的方向性：主要先是沿著樹幹的縱向（axial direction）快速延伸以建立縱向通道，接著是沿著年輪圓周方向的弦向（tangential direction）進行環狀擴張，最後才會緩緩向圓心或外圍邊材方向的徑向（radial direction）深入破壞。這種由內而外、先縱後橫的擴散邏輯，使得樹木在外部視覺上極難察覺已被入侵。

微氣候驅動白蟻的活動高峰

環境微氣候（microclimate）是驅動白蟻活動與破壞速度的最關鍵因子。研究數據顯示，在臺北夏季典型的高溫與高濕環境下（特別是每年的6月至10月期間或入冬之前），白蟻的活動強度與取食量最為驚人，內部損傷率增長也最為快速。另一波次級活動高峰則精確出現在春季氣溫初次大幅回升時。但是季節動態（seasonal dynamics）數據，說明隨著全球氣候變遷（climate change）與都市熱島效應（urban heat island effect）加劇，都市林木面臨白蟻威脅的窗口期正在顯著拉長與變動，管理單位的防災期程必須隨之彈性調整。

應力波技術揭開樹幹內部危機

過去都市樹木健康評估主要依賴人工觀察樹皮是否有泥道或分飛孔，然而白蟻活動極其隱蔽，當外部露出明顯徵兆時，內部木質構造往往已被掏空。為了在不破壞樹木生理功能的前提下及早發現危機，研究導入了二維應力波速度斷層影像系統（2D stress wave velocity tomography）。其運作原理是在受測樹幹水平截面上均勻設置多個應力波感測探針，透過精密微錘輕敲探針產生機械應力波（mechanical stress wave）並量測傳遞速度。

當應力波在傳播過程中遇到白蟻穿鑿的空洞、裂縫或複合腐朽組織時，傳播路徑會被強迫繞道，導致波速顯著下降。系統能將這些波速數據轉換為彩色畫素的二維斷層影像，技術人員可以藉此直觀看透樹幹內部的空洞化分布，並精確計算出各個高度截面的損傷率（damage ratio, DR%），為樹體力學分析與剩餘強度評估提供珍貴的量化數據，舉例如（表1）監測追蹤的樹幹2D應力波影像變化，分別在2022年6月到2023年4月共6次，進行2D應力波檢測，編號29號樹木在離地高30公分處，結果得知腐朽損害率為0 ～ 20%，編號32號樹木在離地高30 ～ 150公分處，共5個高度及6次時間檢測，結果得知腐朽損害率為10 ～ 55%。

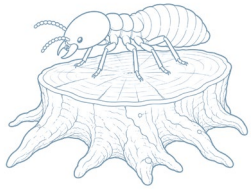
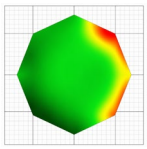
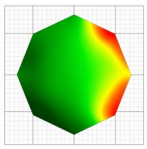
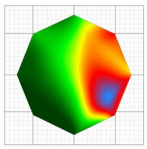
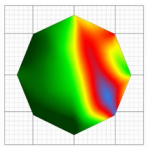
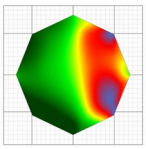
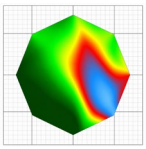
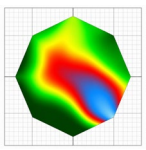
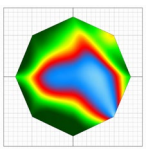
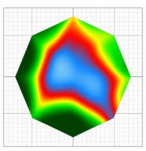
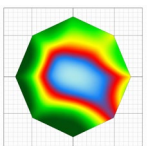
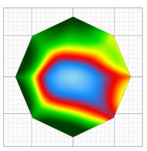
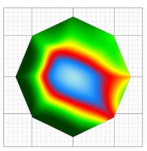
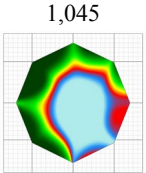
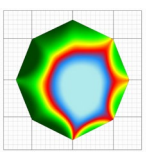
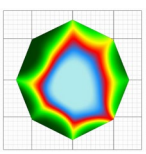
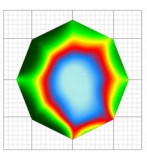
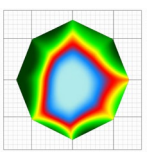
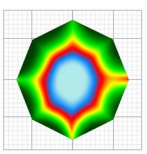
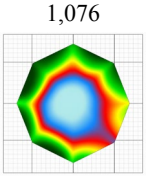
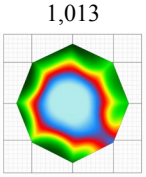
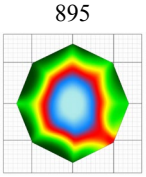
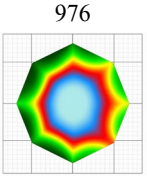
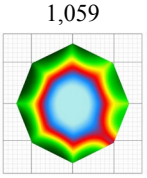
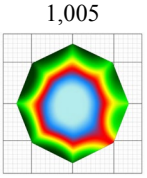
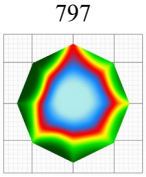
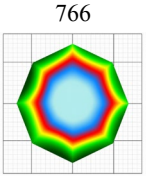
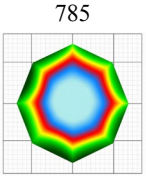
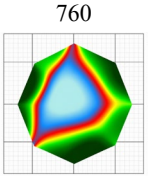
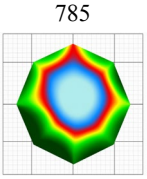
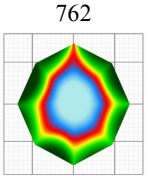


表 1　橫向應力波速度 2D 影像圖：2022 年 6 月至 2023 年 4 月調查的 6 個時間序列中，陸續檢測肯氏南洋杉（No.32）樹木，分別在離地面高度 30、60、90、120 和 150 公分處。

No.	樹高 Tree height (cm)	速度 Velocity (m/sec)	June 2022	August 2022	October 2022	December 2022	February 2023	April 2023
32	150	Max Min	1,643 1,257	1,556 1,190	1,472 1,126	1,571 1,201	1,640 1,254	1,542 1,180
2D								
DR (%)			10	16	37	37	37	37
32	120	Max Min	1,258 962	1,158 886	1,105 845	1,157 885	1,131 865	1,109 848
2D								
DR (%)			40	48	52	52	52	52
32	90	Max Min	1,366 1,045	1,198 916	1,221 933	1,236 945	1,182 904	1,180 902
2D								
DR (%)			54	54	54	54	54	54
32	60	Max Min	1,406 1,076	1,325 1,013	1,170 895	1,276 976	1,384 1,059	1,315 1,005
2D								
DR (%)			54	54	54	54	54	54
32	30	Max Min	1,042 797	1,002 766	1,027 785	993 760	1,026 785	996 762
2D								
DR (%)			55	55	55	55	55	55

DR = damage ratio

長期監測顯示，受危害南洋杉的內部損傷率從完全健康的狀態到極度危險的55%不等。其中最令人驚訝的是，在適宜的夏季溫濕度下，白蟻展現了爆發性的破壞力，部分樹木在短短兩個月內，其核心截面的損傷率就暴增了21%。面對生物入侵，樹木會啟動植物生理學上的樹木腐朽隔離機制（Compartmentalization of Decay in Trees, CODIT），試圖在傷口與被啃食區域周邊分泌樹脂或產生變色屏障，以封鎖白蟻與其共生的真菌向外蔓延。但在族群規模龐大的臺灣家白蟻面前，這道生理屏障往往力量有限。

在本次研究中，一株南洋杉因其多個水平截面的損傷率均大幅超過危險臨界點（如48頁圖1樹幹橫斷面受白蟻咬食劣化情形），經結構載重力學分析後，被判定為具備高度傾倒風險的個體。為了校園與公共安全，決定採取預防性科學減災移除。移除後，隨即對樹幹的橫切面進行實證解剖，結果發現那些在應力波影像中被系統標記為低波速紅色的區域，現實中確實呈現出完全腐朽中空與明顯的咬食痕跡，直接驗證了非破壞性檢測（Non-destructive testing, NDT）診斷數據的準確性。

從撲殺到共存的都市白蟻整合管理

在建構現代都市林業的防護框架時，必須跳脫傳統見蟲殺蟲、趕盡殺絕的舊思維。白蟻在自然生態系統中是不可或缺的生態系統工程師（ecosystem engineers），負責分解枯死木質資源並改善土壤地力。因此，整合白蟻管理（Integrated Termite Management, ITM）的終極目標絕非滅絕白蟻，而是建立一種基於環境倫理的空間隔離（spatial segregation）與平衡，讓人類的資產與大自然的分解者各得其所，以保全環境生態。

這種科學管理哲學強調兩大核心準則：首先是環境不適居性（inhospitality），透過結構上的細部物理設計、排除局部高濕與基部微環境調控，讓人類資產與重要活木或立木對白蟻而言變得極不適宜居住，從源頭切斷入侵誘因。其次是生態族群調節（colony regulation），全面導入精準的誘餌系統（bait systems）。利用白蟻社會性交哺（trophallaxis）與互相理毛（grooming）的行為特性，將昆蟲生長調節劑（insect growth regulators, IGR）由工蟻帶回巢穴深處，達成專一性的標靶族群抑制（colony suppression）。這種策略僅將威脅結構安全的特定活躍蟻群壓制在安全閾值以下，充分體現了科技減災與生態永續保存的兼顧。

基於臺北市肯氏南洋杉的時空動態監測結果，建議管理單位針對高風險樹種採取積極預防策略。首先應建立分級監測數位檔案，定期於春、夏活動高峰前進行二維應力波檢測，並結合地理資訊系統（GIS）進行長期的趨勢列管追蹤。其次應落實環境改善與物理阻絕，嚴禁在樹木基部堆積有機肥料、落葉或盆景土堆，避免其成為地下白蟻侵略的跳板；修剪綠地林木時應避免留下巨大傷口，並妥善修復樹體裂縫，以切斷有翅生殖個體（alates）空中落樹建巢的機會。

最後，主管機關應加速跨領域合作，制定都市林木與既有結構的白蟻防護規範。文中明確建議，當非破壞性檢測的內部損傷率超過臨界值時，必須強制結合樹體結構載重分析（Structural Load Analysis）進行加固或採取預防性移除。透過標準化的科學手段，管理單位才能在綠化景觀與市民生命財產安全之間取得最佳平衡。



結語

都市中的肯氏南洋杉不僅是綠化美觀的風景，更是城市生態韌性（ecological resilience）與安全防線的守護者。透過持續非破壞性檢測科技的研發，管理單位得以更全面且精確地量化樹木的危害現象。這如同現代醫學的預防診斷發展，透過精準的數據評估，能協助管理人員在結構弱化初期即採取正確的標靶處理（targeted treatment），從根本上延長都市綠色資產的健康生命週期。從臺灣家白蟻入侵都市立木的時空動態研究中，科學數據給予我們最深刻的啟示是，面對環境挑戰，唯有將思維由傳統的化學對立撲殺，全面轉向為以數據為基礎的智慧整合管理與共生倫理，才能在追求都市安全性的同時，實現人類資產與自然分解者長期且永續的共榮共存。



圖2　肯氏南洋杉（攝影／陳柏豪）