行政院農業委員會林務局保育研究系列 94-07 號
行政院農業委員會林務局委託研究系列 94-00-8-07 號

非破壞性檢測方法應用於老樹健康監測評估與樹齡測定

Evaluation and Monitor of the Old Giant Trees Health and Age by using Nondestructive Testing Method

委託單位：行政院農委會林務局
執行單位：國立台灣大學生物資源暨農學院實驗林管理處
研究主持人：王亞男　教授
研究人員：王亞男、詹明勳、林法勤、黃憶汝、陳勁豪

中華民國 九十五 年 四 月 十九 日

目錄

一、前言……1
二、前人研究……3
三、研究材料與方法……11
I.材料……11
II 調查方法……12
（I）VTA（visual tree assessment）法……13
（II）腐朽空洞（decay）精密檢查……13
（III）樹木健康度檢測……17
(1)衰退度檢測……17
(2)健康度檢測……19
(3)總和評價……19
（IV）樹齡測定……19
(1)非破壞性檢測生長錐取樣法……19
(2)Soft x-ray 影像分析法……21
(3)交互定年(cross-dating) ……22
(4)樹齡估測法……22
（V）透地雷達（GPR）……23
四、結果與討論……26
I.樹幹腐朽空洞檢測……26
II.樹木健康檢測……44
III.樹齡估測……46
IV.根域範圍探測……49
五、參考文獻……:55

表次

表 1 台中縣珍稀老樹基本資料表……11
表 2 台中縣珍稀老樹樹幹腐朽率摘要表……42
表 3 台中縣老樹巨木衰退度與健康度之評估表……45
表 3 台中市老樹巨木衰退度與健康度之評估表(續) ……46
表 4 台中縣市老樹巨木樹芯處半徑、樹芯長、樹芯年齡及估計樹齡摘要表……48

圖次

圖 1 樹冠、樹幹及根部連鎖（chain）的構造將荷重（load）分散圖.3
圖 2 VTA 法對於樹木診斷的流程，對於我們關注有問題的徵兆原因，進行儀器精密的檢查……4
圖 3-1 力學的缺陷產生的症狀，摘自『樹木メッセージから樹木の危険度診断 1998 』……6
圖 3-2 樹幹內部產生力學的缺陷由外部形成對應的膨脹（swelling）及隆起（bulge）症狀，摘自『樹木メッセージから樹木の危険度診断 1998 』……6
圖 4 樹幹內部側邊腐朽隆起的部分所殘存的健康木質部最薄，檢測時容易誤判另一側健康木質部的厚度(Claus. et. al 1994……9
圖 5 使用 VTA 法判斷樹幹折斷的方法，根據野外調查幹折後樹幹直徑與健全質部厚度的（t/R）比率，一般在 0.3-0.32 以下產生幹折，當發現樹幹腐朽空洞……9
圖 6 應用 VTA 法判斷公園與都市樹木風倒危險評估，一般在德國地區樹幹基徑在 20cm 以上時，平均根系直徑最少應在 250cm 以上，樹木間栽植距離最好也大於這個距離，避免根系競爭(Claus. et. al 1994) ……10
圖 7 徑向超音波測定方法及位置……13
圖 8 DmP（Digital microProbe）儀器配件……14
圖 9 Factometer 組成構建與操作性能的解析圖……16
圖 10 Factometer 對樹芯試材進行典型破壞荷重分佈的測量。A：表示健康沒有缺陷；B：表示部分健康及部分缺陷區分；C：表示大部分都是缺陷部分的區分……17
圖 11 針葉樹巨木反應材生長錐取樣方法示意圖……20
圖 12 樹芯品質檢驗……21
圖 13 樹頭與樹根側面示意圖……24
圖 14 樹頭與樹根平面示意圖……25
圖 15 月眉糖廠樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度……26
圖 16 石岡鄉芒果老樹樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度…28
圖 17 后里三光路刺桐樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強……29
圖 18 后里成功路樟樹樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度…31

圖 19 后里坊寮路刺桐樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度…32
圖 20 東勢東北巷欅木樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度…34
圖 21 東勢楓香樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度……35
圖 22 石岡萬仙黃連木樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度…37
圖 23 東岐樟樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度……38
圖 24 新伯公樟樹樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度……40
圖 25 關東路下方榕樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度……41
圖 26 音波波速與腐朽率之相關圖……43
圖 27 微破壞縱向壓縮與音波速度相關圖……43
圖 28 茄苳樹王平面圖及探測路徑(藍色)，推估地下根位置(褐色) 49
圖 29-1 探測路徑斷層剖面圖(路徑一)……50
圖 29-2 探測路徑斷層剖面圖(路徑二)……50
圖 29-3 探測路徑斷層剖面圖(路徑三)……51
圖 29-4 探測路徑斷層剖面圖(路徑四)……51
圖 30 榕樹全景……52
圖 31 淺層存在樹……53
圖 32 淺層不存在樹根……53
圖 33 路徑 11m 距離根分佈狀況……54

一、前言

老樹是重要珍貴文化資產，對於老樹的保護與管理需要有足夠健康狀態監測資訊提供，一般以生長情形、立木狀態腐朽或空洞等。老樹監測資訊的取得需要發展一套有系統的監測評估方法，以對老樹進行必要的相關保護，老樹是珍貴的文物資產因此不容許採取破壞性的取樣或監測。老樹病蟲害的監測評估已有相關病蟲害調查報告出版，無論在調查與防治的技術方法上已具備。老樹生長情形、樹齡、立木狀態包括主幹腐朽空洞及木材機械強度等相關健康指標則有賴非破壞性檢測方法（Nondestructive Testing Method　NDT）建立與評估，這些資訊的取得將可以幫助我們對老樹健康指標更加瞭解已提供立地環境改善，對老樹施以必要的輔助措施及樹木生理年齡上文化的相關資訊，將對於保護珍貴老樹有更直接的幫助，並依據這些重要診斷（diagnosis）資訊達到實質保護老樹的目的。

木材是一種具有可再生性、環保的二十一世紀之生態材料，但其林木的生長仍受到很多因素的影響，譬如其本身的遺傳因數、生育地的狀況、生長期間的氣候條件、育林技術等，就算是生長在同一個地方，大小、樹形都相當的兩棵樹，我們也不能保證他們的內部性質會完全一樣。另一方面，林產工業在品質管理與生產成本等因素的考量下，為求木材資源的有效利用，歐美各國及日本等先進國家正積極研究以非破壞性試驗來測知木質材料的性質。而所謂非破壞性試驗（Nondestructive Test, NDT）是指藉由非破壞性方法來評價材料的性質或者其內部的構造。在不損壞材料既定用途前提下的一種檢測工作，此項檢測工作的目的，可以用來檢查材料內在或外在的瑕疵、測量厚度，決定材料的結構或組成、測量或檢查物質的性質（柯志裕，1995）。而非破壞檢測應用於林木中的方式有應力波、超音波、阻抗圖譜儀、音速分析儀、軟 X-ray 微密度計及透地雷達對根域範圍的評估……等。而非破壞性試驗是一不可避免的趨勢，因此應盡快建立起立木材質評估的非破壞檢測系統，如此將可進一步瞭解立木的材質，做前期性的品質管制。

本計畫先期對台中縣市政府列於農委會林務局老樹資料庫內之珍稀老樹進行檢測。珍稀老樹透過非破壞性檢測方法以超音波、應力波、阻抗儀並配合生長錐樹芯及因素分析儀對木材材質強度檢測驗證方法，可以使吾人更有效、更精確地掌握老樹巨木樹幹健康狀

態，提出更有效的保護與管理措施。這些樹幹健康監測影像資訊，將建至於老樹巨木管理資料庫內，提供老樹保護實質具體資訊，達成具體目標：

1.建置並應用非破壞性檢測方法評估老樹健康狀態指標系統，本年度首先建置台中縣市政府列管於老樹巨木資料庫內之重要樹種，及接受各縣市政府委託附帶檢測之老樹巨木。

2.以非破壞性檢測方法之生長錐及軟 X-ray 影像分析法測定老樹樹齡，並建立老樹樹輪資料庫，監測老樹生長速率，估算正確老樹樹齡。

3.以非破壞性檢測方法建立老樹巨木樹幹腐朽空洞位置、大小等影像及樹幹木材機械強度等資料圖庫。

4.提出老樹巨木樹幹健康狀況診斷評估，並邀請各縣市政府舉辦研討會說明健康監測各項估指標之解讀與判視，提供縣市政府對各項指標資料掌握。

二、前人研究

樹體結構對於荷重（load）能夠有效的分散，樹冠類似於航行中船隻的帆，枝葉承受風力後將力量傳導到大的枝條並向樹幹傳導；而樹幹可以比喻成船桅，將樹冠所承受的力量收集以後向根部傳導（圖 1）；根系則是船隻的航行在非常高黏性的土壤海中，根系定植入土壤中類似於錨（anchor）的作用，將樹幹傳導到根部荷重重大根、細根分散，最終全部風荷重被周遭的土壤吸收。樹體結構則有賴於我們對於其生物學及力學的瞭解。

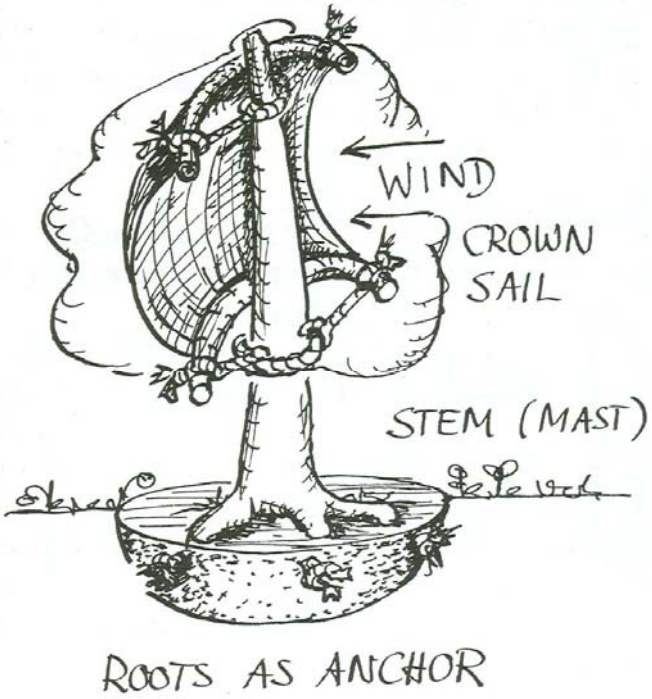


圖 1 樹冠、樹幹及根部連鎖（chain）的構造將荷重（load）分散圖(Claus. et. al. 1994)

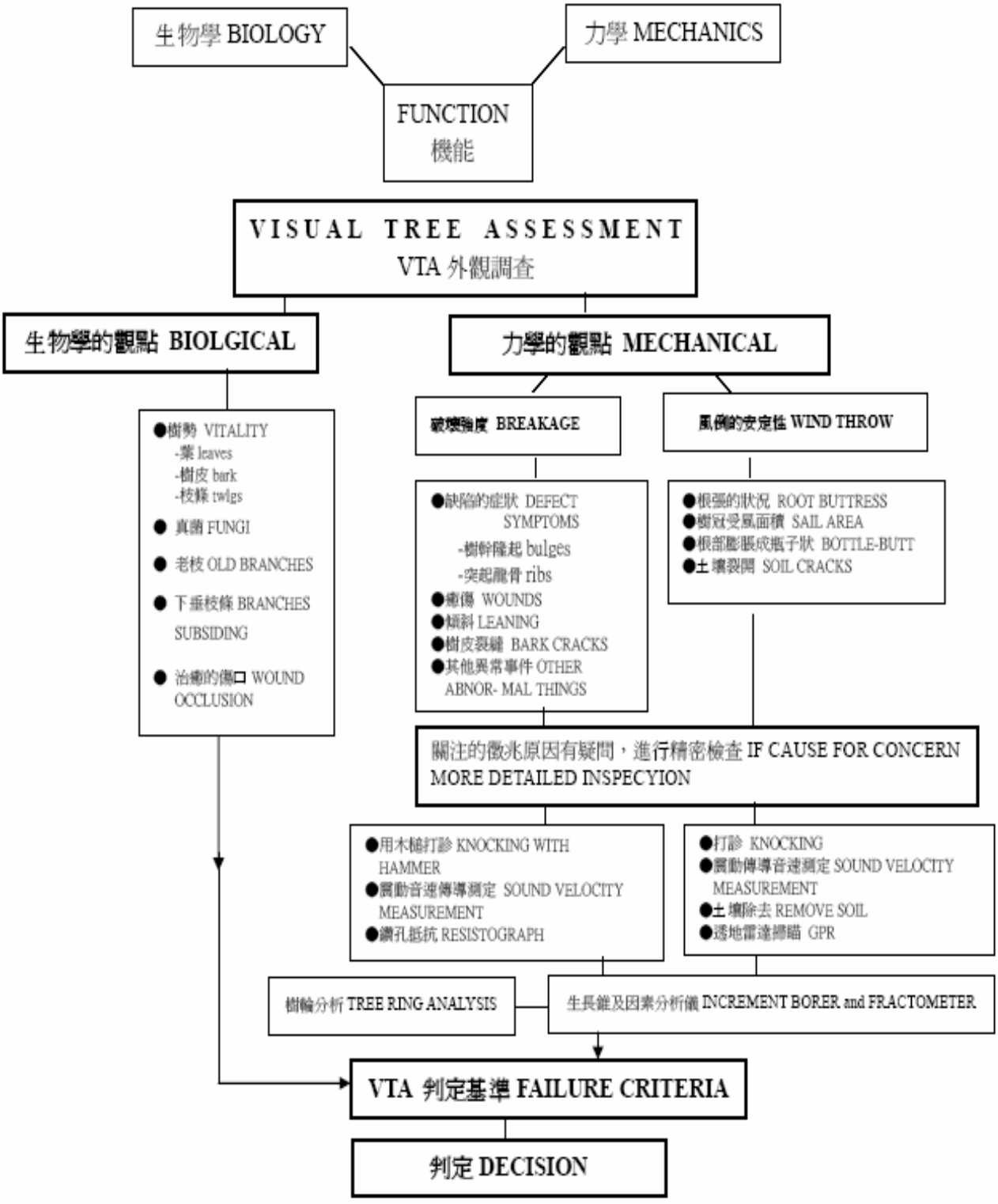


圖 2 VTA 法對於樹木診斷的流程，對於我們關注有問題的徵兆原因，進行儀器精密的檢查(Claus. et. al. 1994)

樹木檢查的指引 VTA 法(圖 2)於野外樹木檢查實際說明，對於定義高損傷危險度樹木時，我們需要瞭解樹木生長的構造與原理。

假使在某些破壞的正常型態下，樹木表面所受到應力的分佈通常是一致的。同時樹木也嘗試著復原到應力均一化的狀態，他們的反應便是在局部形成厚的年輪，我們可以認出傷害缺陷修補（repair）後的症狀。例如樹木表面裂傷（crack）的症狀是像突起的一條肋骨（rib），空洞或軟性腐朽的症狀樹幹表面會鼓起或膨脹腫大（圖3-2）。經驗上培植的樹藝樹木被注意到類似樹木修補號的徵兆已經有一段長時間了。VTA 法是傳統用肉眼觀察評估生物力學（bio-mechanically）探測與評定危險度的基準。假如缺陷的徵兆已經被注意到（圖 3-1），則必須透過嚴密的調查方法與評估確認，像德國客爾斯魯俄（Karlsruhe）研究中心已經廣泛的應用”Metriguard”應力波時儀器（stress-wave timer）於野外的研究調查，以精密的調查與評估確認我們所注意到缺陷徵兆。應力波時儀偵測器主要確認的腐爛（decay）徵兆是由木質素（lignin）的分解所造成的，偵測器同時對樹木也僅有少許的傷害。假如發現有不規則的低頻音速或其他所關注指示的原因，則使用生長錐抽取樹芯並用 Factormeter 測定樹芯強度。生長錐調查方法屬於入侵性（invasive）技術，僅使用在懷疑樹木也許有危險的狀況下才使用。

樹木根部的穩定性也可以用 VTA 的方式評估，任何的缺點使用 VTA 準則評估，他的數量提供給經營決策者對有問題的樹木從生物力學準則得到幫助。

VTA 方法幫助我們解釋無法預測的傷害，諸如木材的脆性，或者是由溫度所引起的例如（夏季造成枝條脫落原因），可以從清楚的區別並預料傷害所形成的由來。自然法則中光度結構允許健康的樹木之間自然枯死率（failure rate）如此可以減少樹種演替的成本。任何一株樹木是不被允許與安全性（safety）沒有所任何相關連性。

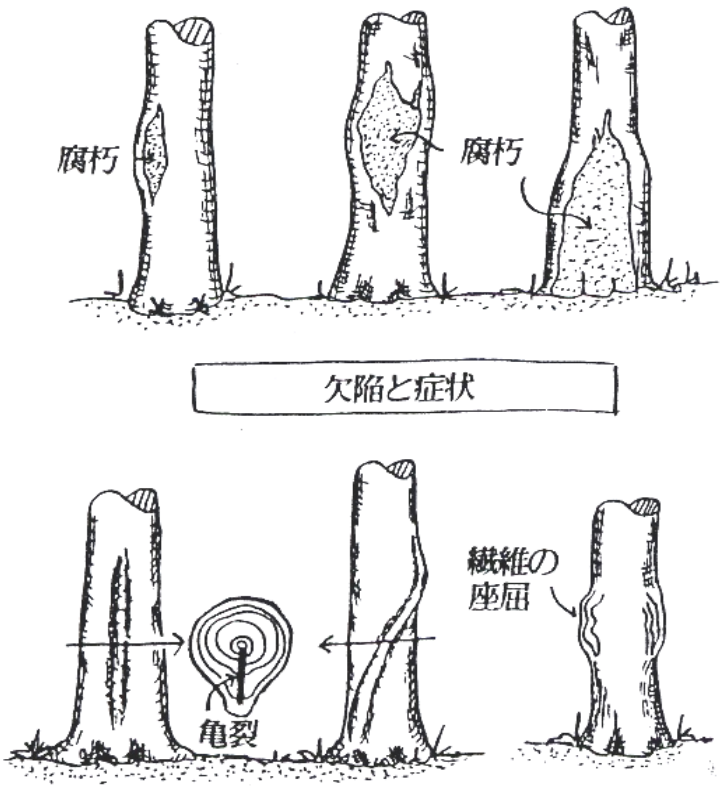


圖 3-1 力學的缺陷產生的症狀，摘自『樹木メツセージから樹木の危険度診断 1998 』

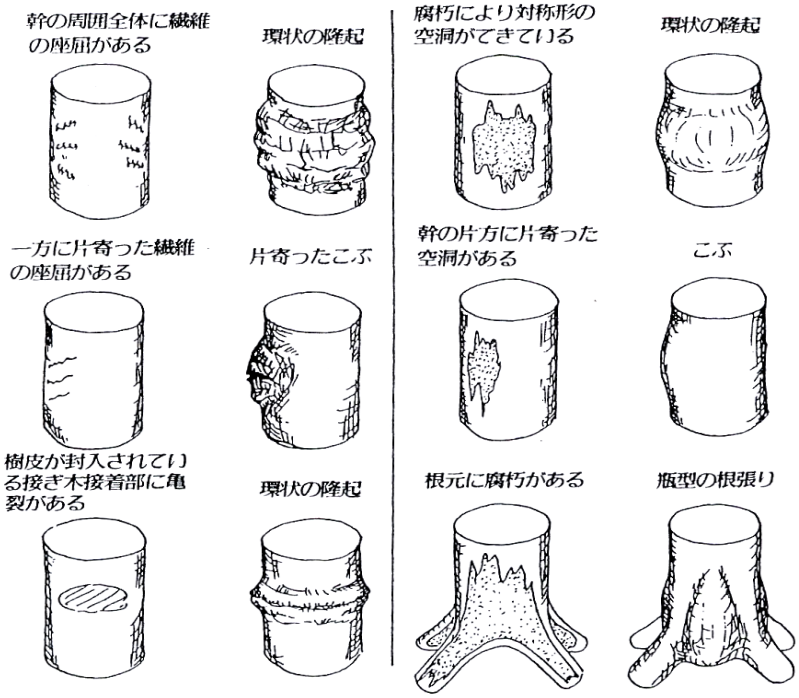


圖 3-2 樹幹內部產生力學的缺陷由外部形成對應的膨脹（swelling）及隆起（bulge）症狀，摘自『樹木メツセージから樹木の危険度診断 1998 』

老樹巨木樹齡很難準確的表示，列報的巨木所估計樹齡多有偏高的傾向（陳明義等 1994）。老樹巨木樹齡估算有其研究技術方法上之困難性；主要受珍稀老樹樹輪不明顯、偏心生長、樹幹腐朽等 3 個因數影響。

樹輪不明顯樹種的樹齡估算近年已發展軟 X-射線影像分析法法再進行交互定年方法(cross-dating)，可獲較精確樹齡的估算（詹明勳等 2005）；影像分析方法可以較有彈性處理分析闊葉樹組成複雜之樹輪構造，尤其闊葉樹排列不規則的導管，樹輪境界（boundary）劃分上很困難。珍稀老樹偏心生長已發展生長錐非破壞取樣方法，避免壓縮材與反應材的取樣獲得正確樹輪寬度資訊，另外樹幹心腐或者受生長錐長度限制（最長 80cm）影響，透過原生樹種樹輪生長資料庫建置及發展生長模式進行估算樹齡，目前亟待建立珍稀老樹生長模式已有效準確的估算樹齡。

Ross (1999)提出木理傾斜角度與應力波傳遞速率有相關性，其中指出應力波傳遞方向與木理平行時波速（約 5000m/s）大於傳遞方向與木理垂直時的波速（約 1170 到 1000m/s 之間），且傳遞方向為徑向波速（約 1400m/s）大於弦向（約 1250m/s）波速大於 45 度之弦徑向波速（約 1000m/s）（如圖 3）。Gerhards（1982）也具有相同結果，其中指出木理傾斜角度增加則波速明顯降低；垂直木理方向波速約為平行木理方向的 1/3~1/4 倍左右，其中以木理傾斜角度超過 15 度時影響最明顯。木理角度在 0°~30°的範圍時，每增加 1°就造成波速 1%以上的降低。

木材腐朽將會造成應力波速大量的降低主要是因為應力波傳遞路徑主要是經由細胞的實質部分完成，主要成份為纖維素，當纖維素受到褐腐菌危害後會是纖維素損害而留下彈性係數較低的木質素因此波速明顯降低，Ross （1999）指出當應力波傳遞時間增加 30%時，其強度已經下降約 50%，且當應力波傳遞時間增加 50%時表示腐朽相當嚴重。

黃彥三等人（1993）在非破壞試驗技術應用於原木材質評估之可行性研究中提到，經由原木斷面橫向超音波穿透時間的測定，可探知原木內部腐朽或孔洞之有無，並加以定位。同時原木斷面直徑方向之超音波時間，會隨內部腐朽或孔洞存在而增加。黃彥三等人（1997）在超音波應用於木麻黃立木樹幹心腐之探測報告中亦指

出，超音波非破壞試驗技術除可應用於木材力學性質之評估外，並可應用於樹木樹幹內部是否腐朽之生物品質評估，並指出原木徑向超音波穿透時間與原木直徑成顯著直線相關性。

Gerhards(1978)曾比較超音波法及應力波法，指出對試材強度較弱的地方，應力波的傳播速度會有較明顯減小的趨勢，當 sensor 間的距離大到某一程度時，超音波法可能因為能量不夠而無法使 sensor 啟動(trigger)，所以無法計算速度，至於能量不夠的原因可能是熱傳導、黏滯磨擦及散射的結果。而以應力波振幅的衰減計算彈性模數，sensor 位於早材或晚材對於應力波傳播時間的量測並無影響。另 Gerhards（1982）針對木材中音波特性進行一系列的試驗，研究發現木材中若有節或交錯木理時，波的型式及速度會有改變，結論並指出應力波在含有節或交錯木理的木材中傳播時，無法維持一個平面的方式前進。

名波直道等(1992)亦曾探討應力波的測定方法，其指出以鎚子敲擊固定在試材上的釘子可以得到明顯的波形，而且多次試驗的差異較小，及其變異係數甚小;至於支援方式的影響，他們則試驗:（1）直接放置在水泥地上，（2）放在泡棉上，（3）放在枕木上，以及（4）堆積等四種情形，得知此四種試材之支援方式對試材應力波的時間差均無差異，所以可以確定支援方式對試驗不會產生影響，此外亦指出敲擊力量的大小亦不會影響應力波的傳播速度。

Beall（2002）指出，就實木而言，橫向超音波速約在 1~2 km/s，徑向波速比弦向波速約大於 50 %。Bucur（1995）則指出由木理平行方向（縱向）所測得之超音波速會明顯大於弦向及徑向者，其原因係為縱向細胞沿著軸向排列，提供一個連續的路徑；纖維長度和縱向超音波速間有一密切的相關性。而超音波在徑向傳遞時，係藉由束狀結構（木質線）移動，但是在弦切面則完全沒有這種組織，所以超音波在徑向波速又會大於弦向波速；除了木質線組織存在於徑切面外，尚有年輪構造（春材、秋材）及介於弦、徑切面中幾何排列不同的細胞，影響著木材的異方性。木材三切面的超音波音速間的比值，L：R：T ≒ 3：2：1，因此木材之異方性可以利用三方向之超音波速的比值加以評估，而且結果合乎木材機械性質。

Bo Kasal（2003）指出，利用樹蕊進行微破壞（壓縮和引張）與 ASTM 標準試片比較發現，壓縮試驗在兩者間有高度相關性，引

張試驗時兩者間也有相關性，但不如壓縮試驗者高，另外在彈性係數（MOE）的表現上亦具有高度相關性。

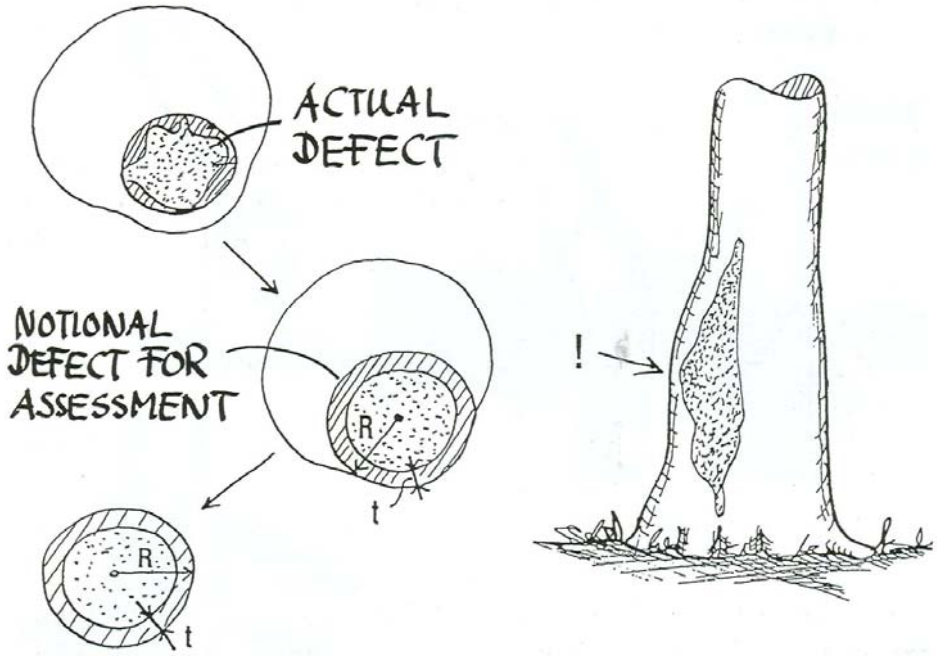


圖 4 樹幹內部側邊腐朽隆起的部分所殘存的健康木質部最薄，檢測時容易誤判另一側健康木質部的厚度(Claus. et. al 1994)

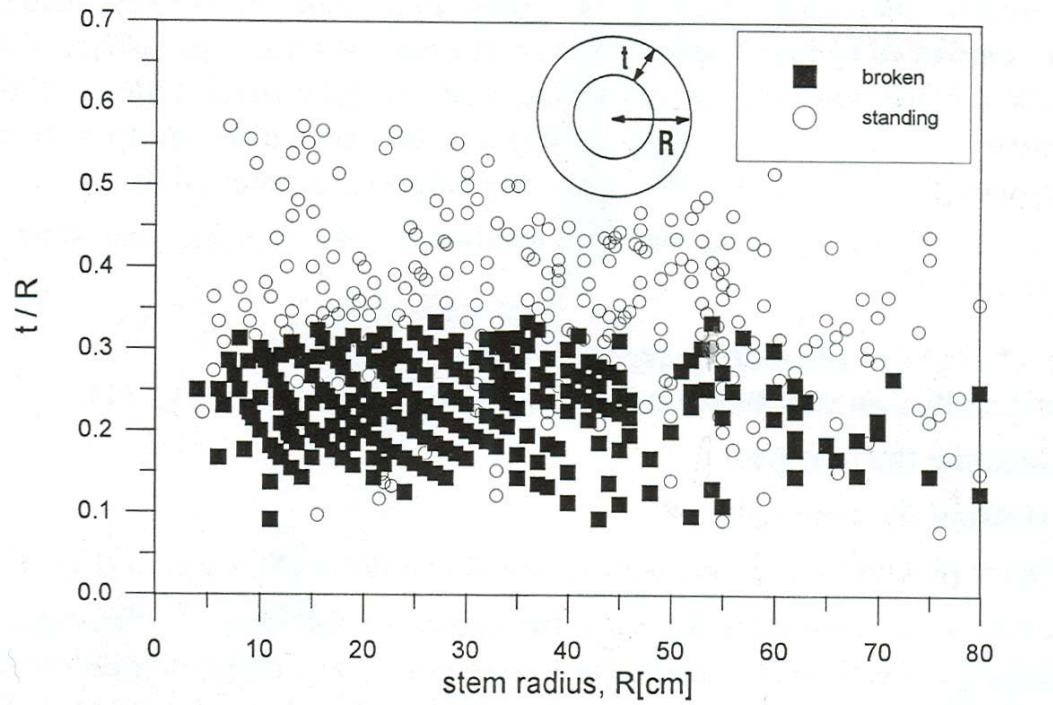


圖 5 使用 VTA 法判斷樹幹折斷的方法，根據野外調查幹折後樹幹直徑與健全木質部厚度的（t/R）比率，一般在 0.3-0.32 以下產生幹折，當發現樹幹腐朽空洞(hollow)時減少樹冠則(t/R)比率降低至 0.25 以下產生幹折(Claus. et. al 1994)

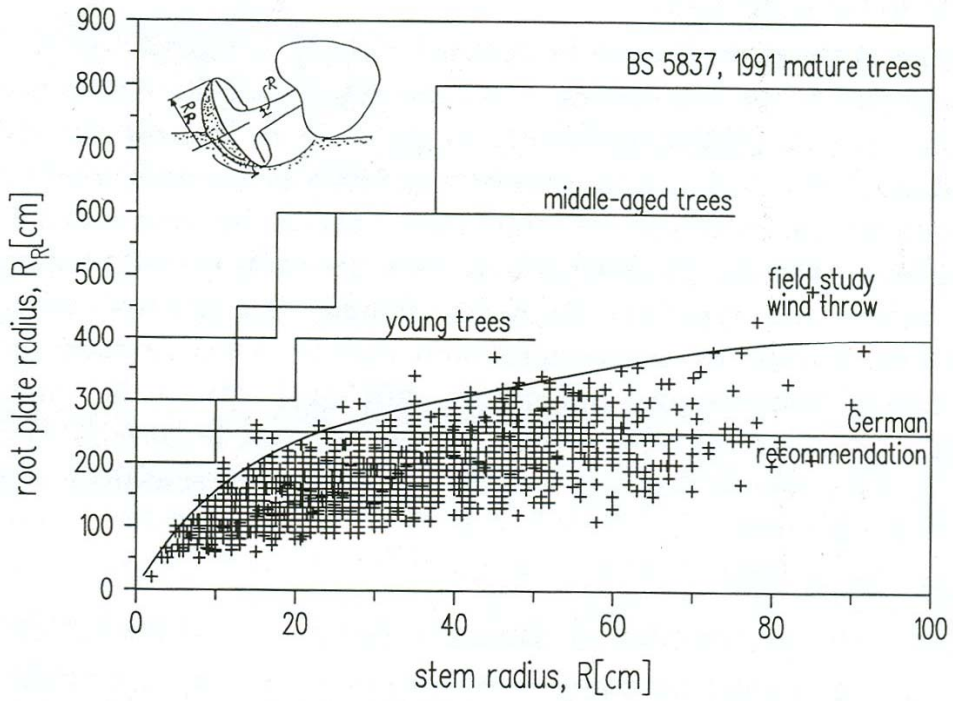


圖 6 應用 VTA 法判斷公園與都市樹木風倒危險評估，一般在德國地區樹幹基徑在 20cm 以上時，平均根系直徑最少應在 250cm 以上，樹木間栽植距離最好也大於這個距離，避免根系競爭(Claus. et. al 1994)

老樹樹幹腐朽空洞危險度評估基準(David,1995)

1.音波速度闊葉樹 900 m/s，針葉樹 700 m/s 為臨界值，以下視為可能腐朽區。

2.因素分析儀微破壞強度 20 MPa/cm^2 為警戒值，低於此值的樹木則視為需加強觀察或補強對象。

3.樹幹(t/R)率係健全樹幹半徑長度與腐朽半徑長度比 (t/R) 約 30-35%以下時，有幹折危險(圖 4,5)。

4. VTA 法判斷公園與都市樹木風倒危險評估，一般在德國地區樹幹基徑在 20cm 以上時，平均根系直徑最少應在 250cm 以上(圖 6)

三、研究材料與方法

本年度首先以非破壞性檢測方法檢測台中縣市政府列管於珍稀老樹資料庫內之重要樹種，及接受各縣市政府委託帶檢測之珍稀老樹。台中縣市政府列於資料庫內之老樹計 44 株，準確資料如表 1，田野調查珍稀老樹時先以羅盤儀訂定出樹幹 E、W、S、N 方位後，將樹幹劃分為 8 個方位區塊分為 N、NE、E、SE、S、SW、W、NW，進行檢測。

I.材料

表 1 台中縣市珍稀老樹基本資料表

編號	樹種中名	二度分帶座標(m)		樹高	Core	Core
台中縣		X	Y	(m)	DBH(cm)	length(cm)
06-0001	玉蘭花	225546	2680270	24	140.13	30.20
06-0002	黃連木	230539	2685390	20	119.43	11.08
06-0003	芒果	230148	2685524	13	162.42	
06-0004	龍眼	229774	2684951	6	78.03	11.33
06-0005	樟樹	228283	2684294	20	156.05	36.13
06-0006	樟樹	227079	2686997	20	229.30	36.36
06-0007	榕樹	211288	2692536	15	111.46	
06-0008	樟樹	233387	2680551	19	133.76	45.00
06-0009	榕樹	211834	2693308	13	197.45	22.98
06-0010	刺桐	221709	2686822	15	159.24	
06-0011	刺桐	220590	2688787	14	146.50	
06-0012	榕樹	211101	2693855	12	105.10	18.91
06-0013	樟樹	221697	2689771	30	190.13	31.61
06-0014	榕樹	204425	2668359	13	149.68	5.83
06-0015	樟樹	219406	2690290	17	273.89	
06-0016	榕樹	203666	2671584	15	143.31	19.06
06-0017	榕樹	203724	2672767	19	117.83	31.25
06-0018	芒果	222618	2681814	20	191.08	31.72
06-0019	黃連木	228822	2684993	20	90.76	29.80
06-0020	榕樹	228822	2684993	20	140.13	38.50
06-0020	榕樹	228822	2684993	20	140.13	37.36
06-0021	榕樹	233710	2677607	15	116.24	10.68
06-0022	榕樹	233710	2677607	15	116.24	32.72

06-0023	榕樹	233698	2677595	20	219.75	41.25
06-0024	楓香	233695	2677833	20	126.11	24.20
06-0025	櫸	235366	2684887	25	240.76	33.91
06-0026	樟樹	234970	2683754	13	133.76	
06-0027	榕樹	233698	2677595	20	219.75	
台中市						
19-0001	茄苳	212478	2670703	13	103.82	39.72
19-0002	榕樹	211815	2669257	11	123.25	29.50
19-0003	榕樹	211807	2669263	11	70.70	32.80
19-0004	榕樹	215236	2677397	15	264.33	25.20
19-0005	榕樹	212233	2674958	12	76.43	36.70
19-0007	榕樹	211314	2673240	18	124.20	26.00
19-0008	芒果	221921	2673718	12	70.06	40.31
19-0009	芒果	221928	2673732	12	70.06	22.22
19-0010	芒果	221928	2673732	12	70.06	10.76
19-0011	芒果	221909	2673728	12	70.06	29.76
19-0012	芒果	221895	2673774	12	70.06	42.99
19-0013	芒果	221858	2673762	12	70.06	26.87
19-0014	芒果	221865	2673751	12	70.06	20.81
19-0015	榕樹	217120	2672680	16	187.90	34.25
19-0016	榕樹	217106	2672681	16	111.46	39.55
19-0017	茄苳	214637	2672892	20	109.87	33.73
19-0018	荔枝	216198	2672877	10	75.80	13.82

II 調查方法

1.老樹基本資料調查（ex： DBH、樹冠幅），並 Claus.et.al.(1994)所提之用 VTA 法（visual tree assessment） 目視檢查老樹外部評估是否有遭到生物(ex:白蟻、植生、菌類)、機械、環境等之傷害(hazard)。

2.利用羅盤儀定出方位，由 1 號（北方）開始順時針依 60 度為一點打入不銹鋼探針，進行音波試驗（以音波速度 900 m/s 為臨界值，以下視為可能腐朽區）。

3.進行鑽孔抵抗的試驗，以瞭解樹幹內部組織的疏密度，進而瞭解是 否受到腐朽產生空洞。

4.利用生長錐鑽取樹芯，以縱向微壓縮破壞試驗（強度 20 MPa/cm^2 為警戒值，低於此值的樹木則視為需加強觀察或補強對象），期瞭

解木材的強度，與老樹的實際年齡。

（I）VTA （visual tree assessment）法

利用眼睛觀察林木外觀，藉此判斷林木材質優劣與否。評估項目包括樹幹通直性、分叉、斷頂、腐朽、空洞、病蟲害、枝葉繁盛、樹冠長、生長勢、枝節性多少、活節及死節數大小、樹幹表面是否隆起等 （藤井英二郎及宮越利ソカ 1998）。

VTA 法分為依分為三階段進行：

（一）樹勢外觀的調查，因內部的缺陷會造成外觀的改變。

（二）在確認其症狀後，再精密的儀器檢查其缺陷的有無。

（三）缺陷確認後，在立木有危險性顧慮的場合時，進行缺陷程度估計及殘存強度的評估。

（II）腐朽空洞（decay）精密檢查

1、超音波儀

使用超音波測定儀（CBS & CBT, SYLVATEST, 16KHz）測定各試材在胸高直徑部位之橫向超音波波速（V_R），及縱向超音波波速（V_L）。利用超音波測定儀在立木之胸高直徑部位（距根部約 130 cm 處）測量其 0°、60°、120°、180°、240°及 300°度等六個不同方位之橫向超音波傳遞時間，進而計算出徑向超音波波速（V_R）（圖 7）。施測時可在立木樹皮上先打鐵釘，以利超音波儀的發射探頭及接收端探頭接觸到鐵釘上。

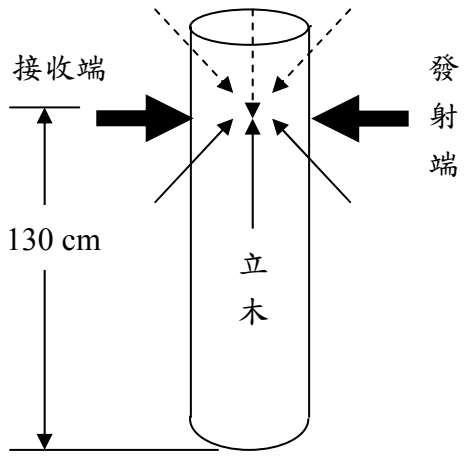
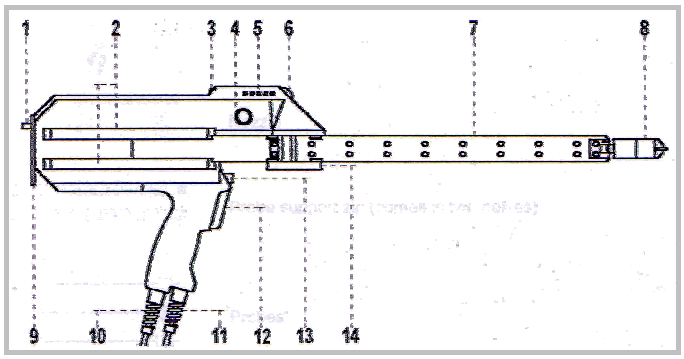


圖 7 徑向超音波測定方法及位置

2、DmP 非破壞檢測系統

本實驗所使用之 DmP 非破壞檢測系統，圖 8 為 DmP（Digital MicroProbe）儀器配件圖示說明（Digital MicroProbe 儀器說明書），是利用配備的馬達驅動探針鑽入木構件中，測得木構件對探針的鑽孔阻抗強度。其探針頭為扁平匙狀，長度為 1.5mm。藉助此儀器與電腦連線，可瞭解木構件劣化之程度與損壞位置，可提供後續構件修復之重要參考資料，對於古蹟及歷史建築結構安全性評估極為重要。所得之鑽孔阻抗力分佈圖中 Y 軸之數值代表探針鑽入木材時鑽孔阻抗力之高低，當探針遇到密度較高的部分時，鑽孔阻抗力增加，探針旋轉的次數就會增加，相對的當探針遇密度較低之木材時（如腐朽的位置時），鑽孔阻抗力下降，探針旋轉的次數便會減少。



1.手動式探針鬆開螺絲　　2.鏈帶安置軌道

3.探針鬆開警告燈　　4.電瓶容量檢查鈕

5.使用時壓力指示燈／用電標準指示燈　　6.超負載安全鈕

7.探針支撐鏈帶　　8.探針管嘴

9.攜帶式皮帶架　　10.電源電纜線

11.電腦數據電纜　　12.板機鈕

13.探針鬆開鈕　　14.鉗口配件

圖8 DmP （Digital microProbe） 儀器配件

3.因素分析儀表（Factometer）

老樹危險度檢查（safe inspection）過程中，測定缺陷周圍部分的所剩餘厚度的木材強度指標，可以提供我們所需並且可已接受的最小安全臨界值，這是對木材強度試驗很重要的部分。應用 VTA 系統的方法對偵測老樹外部腐朽的信號位置或確認產生的徵兆，應用生長錐由這個位置鑽取樹芯（core）用 factometer 進行強度測。Factormeter 原理是利用內部裝置的一個彈簧荷重（spring-loaded）旋轉的方式對取出的樹芯大約每間隔 1cm 進行折斷破壞。這個輕便小巧的的測定儀器是由德國客魯斯魯俄研究中心的 Erich Hunger 及工作夥伴 Wiesloch 共同研發。每次進行樹芯破壞時，彎曲瞬間的強度 M 值就會被紀錄下來。同時瞬間彎曲破壞的角度 ψ 也被紀錄。當斷裂發生（fracture occurs）時應力 α 可以視為 α＝ψ。一般以下列數式表示

$$U = \int_0^{\alpha} M d\phi$$

圖 9 M(ψ)這個斜線區域則是樹芯樣本斷裂所需要的能量(energy)，從這個觀點上去看折斷機械強度，同時記錄試料破壞瞬間的特徵，並體現木材抵抗破壞的強度。圖 10 應用 factometer 測量典型的破壞能量的剖面圖，X 軸系沿著樹芯樹皮的髓心方向的長度，Y 軸極微木材腐朽空洞（cavity）的強度。

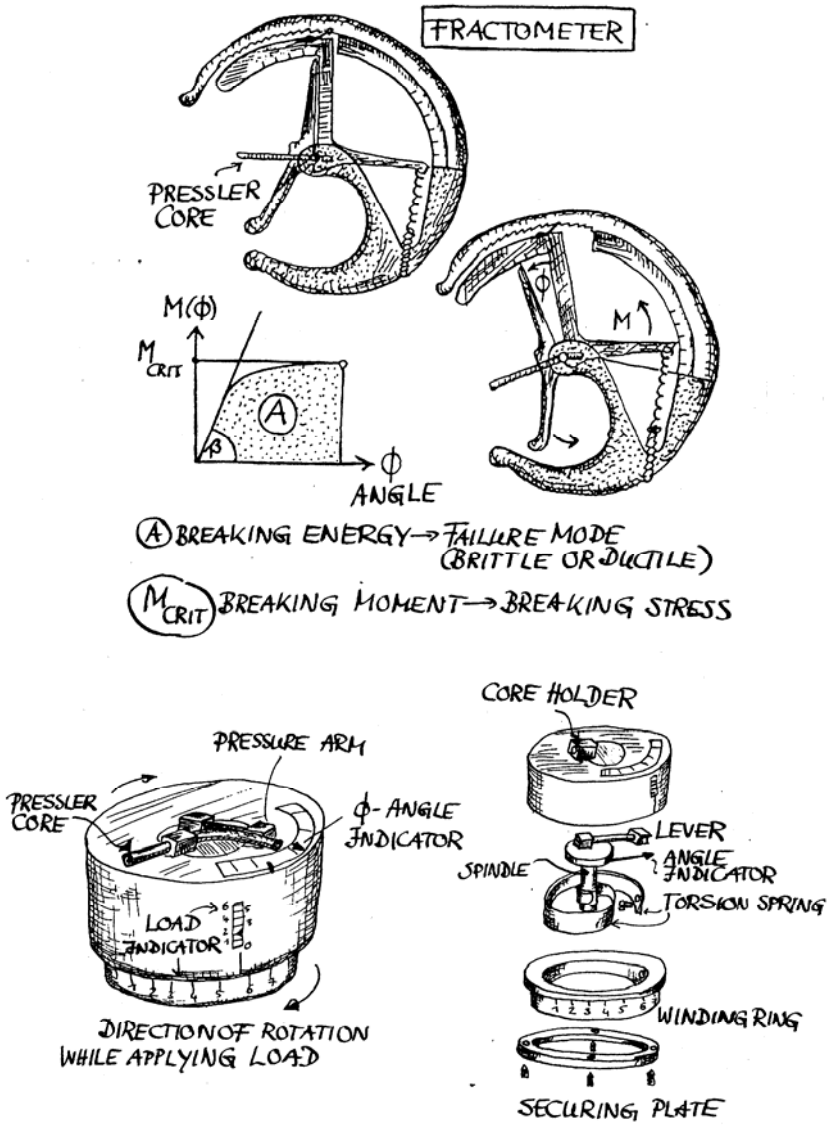


圖 9　Factometer 組成構建與操作性能的解析圖(Claus. et. al. 1994)

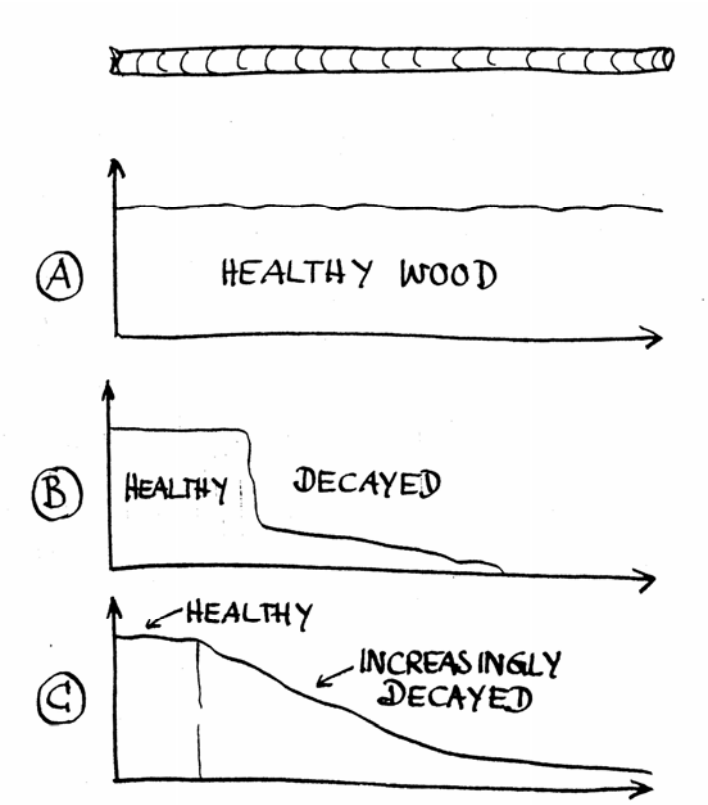


圖 10　Factometer 對樹芯試材進行典型破壞荷重分佈的測量。A：表示健康沒有缺陷；B：表示部分健康及部分缺陷區分；C：表示大部分都是缺陷部分的區分。(Claus. et. al. 1994)

（III）樹木健康度檢測(摘自日本樹木醫會 堀大才 2004)

(1) 衰退度檢測

衰退度檢測評價項目：樹勢、樹形、枝的伸長量、枝梢枯損、枝葉密度與樹皮的狀態。(檢測標準詳如附錄 3,4)

(a)樹勢從 0~4 級：

0 表示旺盛的生長，完全沒有被害的狀態

1 雖有受到些許影響，但看不太出來

2 異常狀態可以明顯的看出

3 生育狀態非常惡劣

4 幾乎枯死

(b)樹形從 0~4 級：

0 保有自然的樹形

1 樹形有點亂，但仍與自然狀態相近

2 自然樹形破壞明顯地進行中

3 自然樹形幾乎崩壞，並形成特殊的樹形
4 幾乎完全崩壞
(c)樹冠從 0~4 級：
0 正常
1 雖有少量減少，但看不太出來
2 樹之變短變細
3 樹之極度變小，產生薑狀的結間
4 只有下方的新枝有少量的生長
(d)樹梢端枯損從 0~4 級：
0 無
1 雖有少量減少，但看不太出來
2 相當多
3 明顯很多
4 沒有樹梢
(e)下枝端枯損從 0~4 級：
0 無
1 雖有少量減少，但看不太出來
2 相當多，且切斷部分明顯
3 明顯很多，且有大之斷落
4 幾乎沒有健全的枝端
(f)枝葉密度從 0~4 級：
0 枝葉密度達到平衡
1 比 0 落遜一籌
2 略為稀疏
3 有許多枯死的情形，葉的生長減少，明顯地稀疏
4 幾乎沒有枝葉
(g)樹皮狀態從 0~4 級：
0 幾乎沒有傷
1 有些穿孔或傷，但不甚明顯
2 有舊傷
3 從傷口處產生的腐朽明顯
4 有大的空洞或樹皮剝落

衰退度=各項目地評價的合計/評價項目數

衰退度分成五級分述如下
1. 0.8 未滿，表示[優良]
2. 0.8~1.6 未滿，表示[稍微不良]
3. 1.6~2.4 未滿，表示[不良]
4. 2.4~3.2 未滿，表示[明顯不良]
5. 3.2 以上，表示[快要枯死]

(2) 健康度檢測
根據超音波速度(m/s)與空洞腐朽率(%)評估健康度並分成四級。
健康度 1 級：腐朽率 無~25%
健康度 2 級：腐朽率 26~50%
健康度 3 級：腐朽率 51~75%
健康度 4 級：腐朽率 76~100%

(3) 總和評價
衰退度與加健康度之平均值，分成四級。
1 級：健全　2 級：需注意　3 級：要注意　4 級：危險

（IV）樹齡測定
(1)非破壞性檢測生長錐取樣法

為避免壓縮材與引張材之樹輪寬度過高或過低的取樣，以及造成生長錐鑽取不到的部分至髓心的距離，因此反應材取樣與正確髓心的方向位置所估測的半徑長度為本研究發展生長錐取樣技術重要的方法。本計畫以生長錐法決定髓心與半徑方法，反應材之生長錐取樣技術方法步驟，首先在巨木上坡處找到樹幹引張材或壓縮才頂點位置如圖 11 之 D 點，並用小鋁釘定出位置點。然後決定巨木樹幹與坡垂直方向，依據不同樹種（針葉樹或闊葉樹）如圖 11 之 B 或 E 位置，先初步判斷選擇樹幹形狀較為較規整圓弧形之一面用用生長錐試探性鑽取 5-10cm 長度樹芯，並且要把握在上、下坡垂直兩側之位置，並且盡量貼近地際處鑽取，量取地際處到鑽取樹芯位置垂

直高度；判斷樹芯品質樹輪分佈在樹芯是否為整正之同心圓形，依據現場經驗每支可用樹芯取樣至少需要試驗數次左右；偏上或偏下造成如圖 11 A,C 位置之樹輪分佈，可以作為判斷髓心鑽取位置向上或向下的調整依據。找到 B 點位置後盡可能鑽取一段完整且最長的樹芯，遇到腐朽空動或節的部分可在樹幹垂直位置向上或向下調整鑽取位置，同時坡上反應材頂點位置應一併調整高度與平行，並量取 B 至 D 的線段長度 a；E 的位置則用 a 線段長度決定，量取時應注意高度要平行位置才不會偏移影響半徑的測量與取樣位置的正確性。

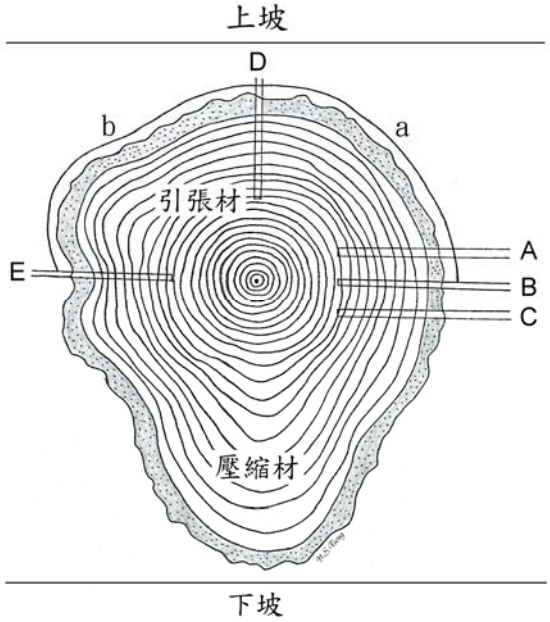


圖 11 針葉樹巨木反應材生長錐取樣方法示意圖

A，C：incorrect position(increment bore)

B，D，E：correct position

a ：B to D length(cm）

b ：D to E length (cm)

core radius（r）= (a+b)/π

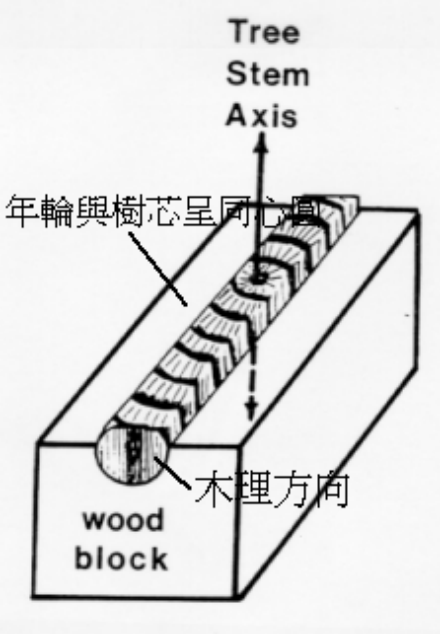


圖 12 樹芯品質檢驗

(2)Soft x-ray 影像分析法

取樣樹芯以甲醇(98%)溶液浸洗冷抽出，並置換抽出液直到顏色變為澄清，再用蛋白膠固定樹芯後，以高精密度平臺鋸切割樹芯成厚 2mm、寬 5mm。樹芯樣本在恆溫恆濕箱中調整含水率至 12-15%。

拍攝樹蕊樣本之軟 X-射線機(HP CABINE X-ray system series MODEL 43855B)為惠普公司生產，照射條件：(1)X-射線距離樹芯 62.5 cm，照射負片的範圍 25.4cm x 11.5 cm (4.5 in x 10 in)，(Kodak Industrex film M (ready pack II))；(2)X-射線強度 14 PkeV，3mA，照射 7 分鐘。

樹芯樹輪 8 個特徵值的獲得使用影像分析法（詹明勳等，2005），整合影像分析套裝軟體 Image Pro Plus 4.5.0.29®version for Windows 版軟體、統計應用軟體 Sigma Plot 2001 for Windows Version 7.0、時間序列擷取軟體 TsapWin Professional 0.23b Version 5.1 及 Tree Ring X-ray 32（Norbori ,1989）等軟體對樹芯樹輪寬度及密度擷取。這 8 個特徵值中，年輪寬度包括：年輪平均寬度、早材平均寬度及晚材平均寬度，密度部分則包括：年輪平均密度、早材平均密度及晚材平均密度、最大密度以及最小密度。

(3)交互定年(cross-dating)

交互定年原理是取自不同來源樹種的樹輪樣本，可以藉著樹輪寬的變化型態互相比對，並且能夠向前延伸年表時間(Cook ,1985)，目的是正確定出每一個年輪的形成年代，才能建立準確的年輪寬度變化年表。生長在相同生態環境中的樹木，其接受外界的氣候及限制條件是一樣，因此年輪變化也應該一致，但是實際上樹木受微環境變動或本身生理的影響，而有如偽輪、丟失輪等變異現象發生。

交互定年的步驟包括：(1)辨識出每一年輪的界限、寬度變化的特徵；(2)檢查上述特徵在各樣本中的一致性；(3)找出與眾多樣本吻合的個例；(4)判斷不一致的原因，是偽輪或丟失輪等所造成的差異，再進一步予以調整；(5)根據年輪寬窄型態將眾多序列連貫起來；(6)最終建立起精確的年輪寬度年表。本研究以 CDendro 程式(Elektronik,2005)對 27 株 40 個樹芯樣本試材的樹輪寬度值進行交互定年的相關檢驗，以確定量測和交互定年的準確性，同一地區性生育地不同樹種間樹輪寬窄變化的序列與主序列間平均相關係數一般設定在 0.25-0.45 之間低於或超過都不能接受。

(4)樹齡估測法

樹齡估測參考美國世界爺已發展有關 di 值既有經驗模式估算的方法（stephenson et al. , 1995）。di 值是測單位時間內年輪寬度變動樹木生長速率，一般世界爺樹輪在 0.2~0.5 rings/mm 或 5~2mm/rings（d>1）表示處在年輕生長快速時期，因此樹輪寬度隨樹齡改變極小。另一方面假如我們發現非常窄樹輪 0.3-0.4 mm/ring，換算過來 2.5~3.3 rings/mm（d<1），所估測樹齡差異很大。

[1] $a = br^d$ ----一般估測線性模式

a=樹齡

b=生長率 $(\frac{rings}{mm})$

r=半徑(m)

d=樹輪寬度隨時間改變的速率

d=1 樹輪寬度隨時間變化是一個線性常數

d＜1 樹輪寬度隨時間變化樹齡增加

d＞1 樹輪寬度隨時間變化樹齡減少

[2] $c = br^d - b(r-g)^d$

c=樹芯樹齡（樹芯樹輪數目）

g=樹芯長度（cm）

[3] $a = \frac{cr^d}{r^d - (r-g)^d}$

合併方程式[1]及[2]後估算生長錐鑽取部位樹齡

[4] $a = (c - c_i) + \frac{c_i r_i^{d_i}}{r_i^{d_i} - (r_i - g_i)^{d_i}}$

$a = (c - c_i) + a_i$

a = 生長錐鑽取處樹齡

r = 半徑 (cm)

g = 樹芯長度（cm）

c = 樹芯樹輪數目

a_i = 樹芯最內面 2i 個樹輪數目

g_i = 樹芯最內面 i 個樹輪長度

r_i = 樹芯最內面 2i 個樹輪長度

c_i = 樹芯最內面 i 個樹輪數目

d_i = 樹輪寬度變化隨時間改變的速率

[5] $d_i = \frac{In([a_i - c_i]/a_i)}{In([r_i - g_i]/r_i)}$

本計畫用最內面樹芯(inner core)樹輪估測 d_i 值比用整支樹芯做樹輪估測相對精確，內面樹芯有足夠的年輪數目將氣候改變、林火或者彼此間的競爭對年輪寬度變異的效應最小化；一般而言是靠近內部樹芯樹輪寬度變異對於環境變遷反應較小，但是僅有少數的樹輪可以在未取樣的樹幹半徑部分精確地反映出生長。

（V）透地雷達（GPR）

透地雷達是一種非破壞檢驗的手段，以雷達波作為媒介，向地

下發射雷達波，再依照回波的資料進行分析，藉以推測地面下主探測目標物的狀況，目前透地雷達主要運用在土木工程及環保領域，用以探測地面以下或混凝土結構中之管線、孔洞、鋼筋、裂隙、埋入物與地體構造等資訊。透地雷達探測之媒介為電磁波，電磁波為一種能量傳遞的形式，透地雷達使用的探測電磁波頻率範圍為1MHz 到 2GHz，相對應的波長為 300m 到 0.15m。每一種天線只能發射接收一固定頻率的電磁波，不同頻率的電磁波的探測特性也不相同，一般而言頻率愈高的電磁波的解析度愈高但是探測深度愈淺。

透地雷達初次對植物根系的探測結果，採用的是頻率 1MHz 的天線，探測目標是老樹並且應用在老樹棲地改善上可避免傷及老樹根部及大規模開挖初步成果顯示具有潛力並值得進一步研究。

確保探測範圍內有樹根存在，故先觀察樹頭處有根向外生長跡象(圖 13)，可推估有地下根延伸者進行測試，測試路徑與推估樹根發展之方向垂直。以 1GHz 天線進行探測，路徑取與推估樹根生長方向之垂直方向，雷達回波在有物體處造成不同的回波，因此可以推估出地下樹根延伸之概略位置(圖 14)。

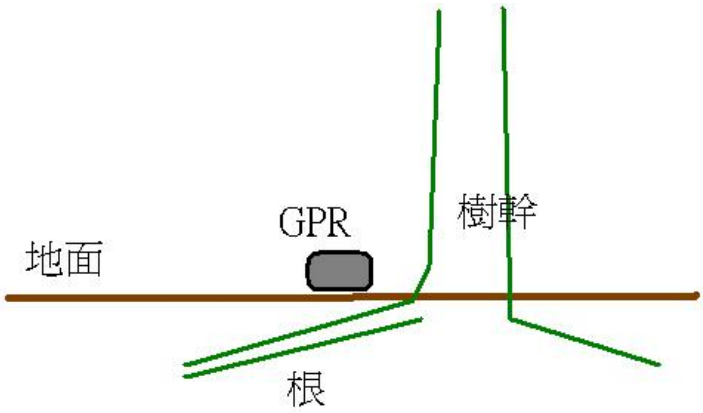


圖 13 樹幹基部與樹根側面示意圖

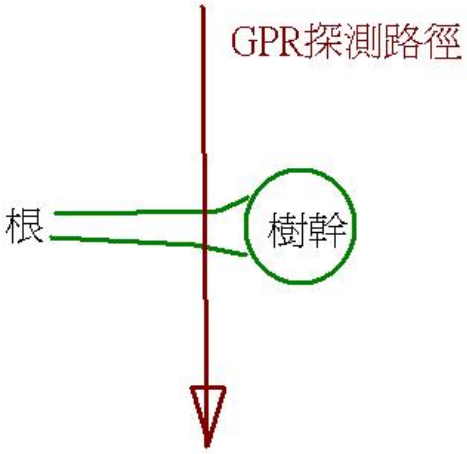
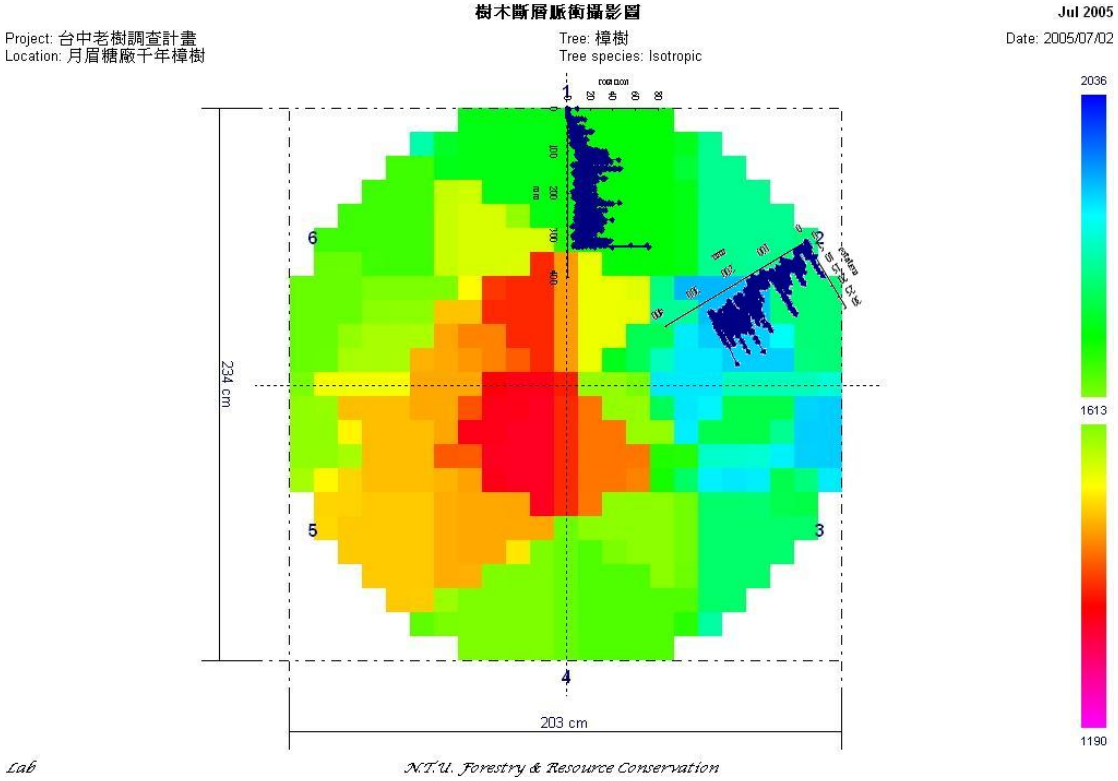


圖 14 樹幹基部與樹根平面示意圖

四、結果與討論

I.樹幹腐朽空洞檢測

1.月眉糖廠樟樹



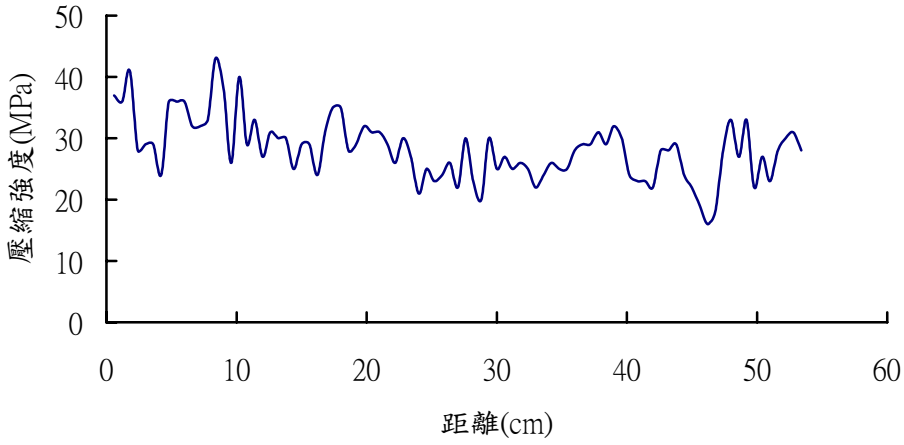


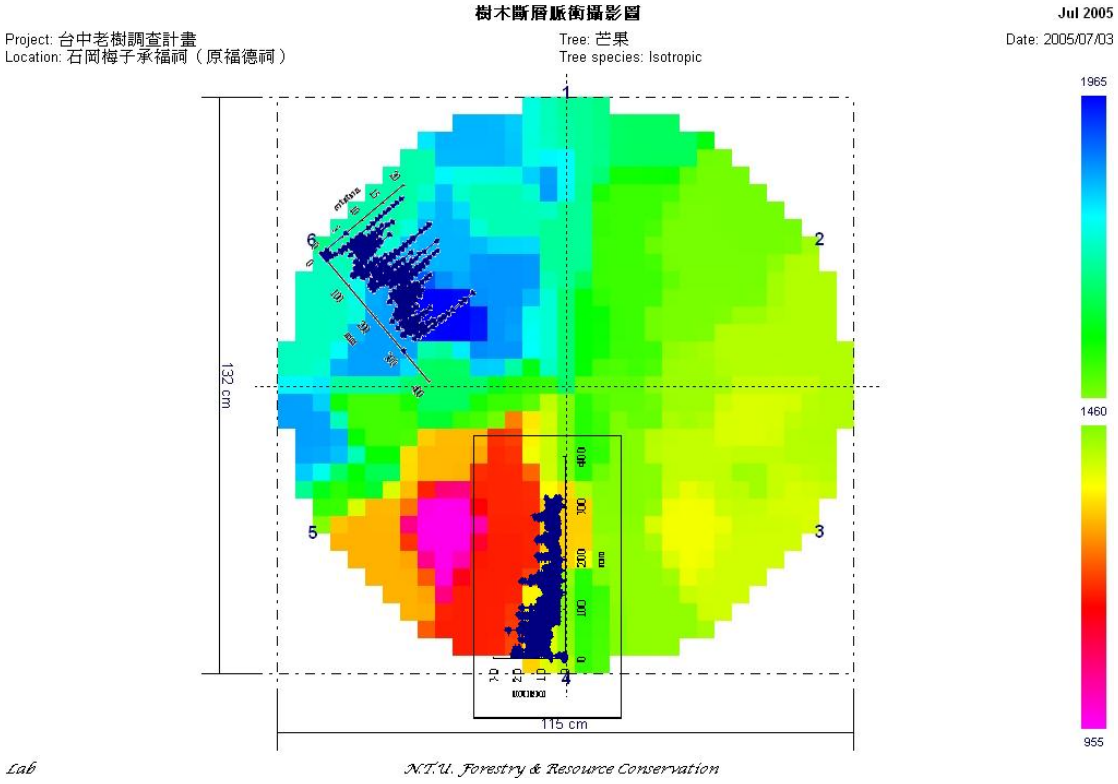
圖 15 月眉糖廠樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

月眉糖廠旁的樟木老樹的胸高直徑為 213 公分，海拔 212 公尺，樹高約 17 公尺，冠幅約 800 m^2，於當地又有澤民神木的稱號。平均音波速度為 1629±145.7 m/s，再依整體的音波斷面圖 15 顯示，整株樹木在 5 號(西南方)方面往樹心的位置處比樹木的其他方向音速低，但最低的音速也在 1330 m/s 以上，所以此棵神木的腐朽或空洞

率不明顯，用鑽孔抵抗後顯示無腐朽現象，此項結果與音波推估的結果相符，而 2 號和 3 號方面的音速值是此樹中最高的地方，推估此處的材質可能是最好的，而且外部比樹木內部好。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，壓縮強度由樹皮的位置向樹心的方面慢慢下降，平均的壓縮強度 28.3±5.06 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 16 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 43 MPa/cm^2，故由微破壞壓縮強度和標準試片的縱向壓縮強度的高相關性而言，澤民神木的木材壓縮強度也與微破壞的壓縮強度相當。而由微破壞壓縮強度的圖顯示的結果與音波的推估相符，亦即外周比內部材質為佳，而由強度的觀點而言，澤民神木應無立即倒塌的危險，同時樹芯的狀況良好，無腐朽或空洞的情形。

2 石岡梅子承福祠芒果



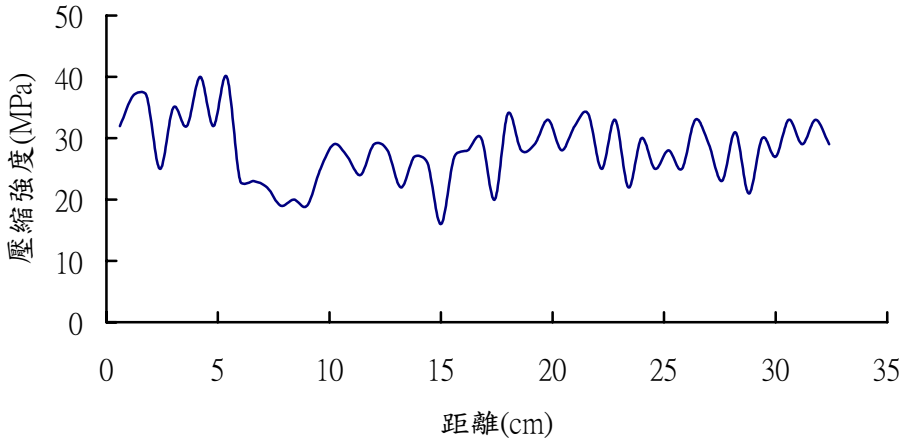
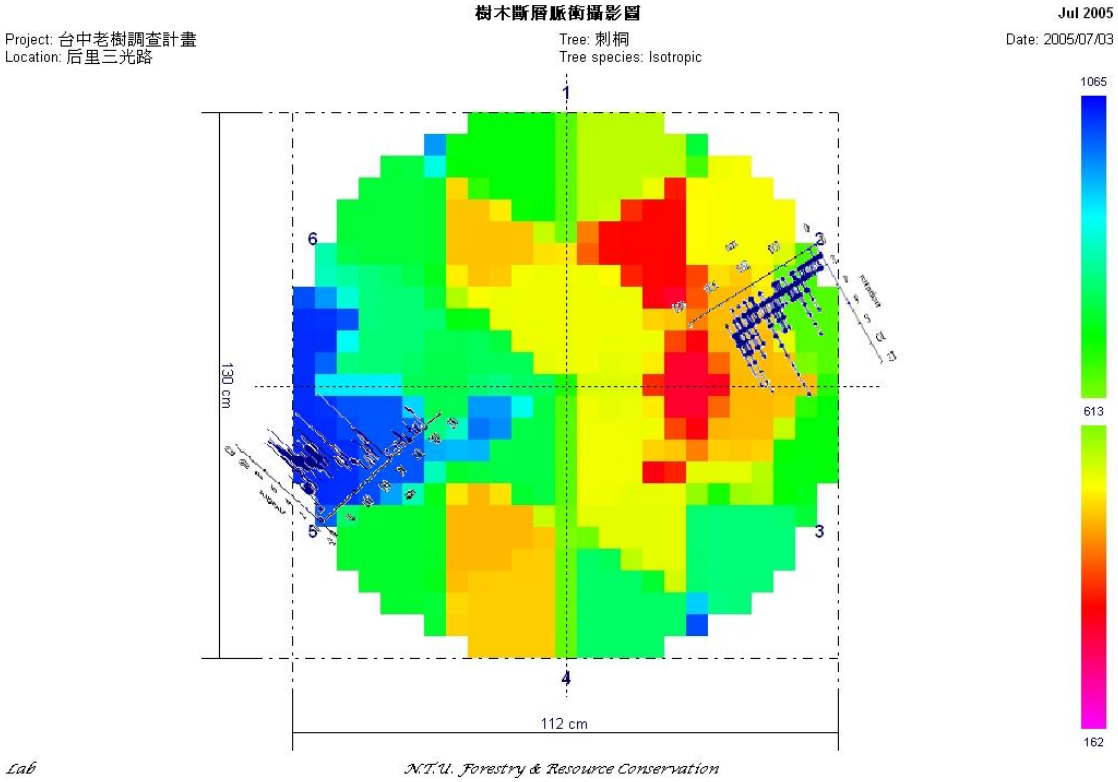


圖 16 石岡鄉芒果老樹樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

石岡鄉梅子的承福祠之芒果老樹的胸高直徑為 132 公分，海拔 319 公尺，樹高約 13 公尺，冠幅約 300 m^2。平均音波速度為 1520±193.2 m/s，再依整體的音波斷面圖 16 顯示，整株樹木在 4 號(南方)與 5 號(西南方)方面靠近樹皮的地方音波的波速較低，最低的音速是 986 m/s 左右，所以此棵樹木的腐朽或空洞率尚不明顯，用鑽孔抵抗發現此樹在探針的範圍內無腐朽的現象，與音波的推論很相似，而 1 號和 6 號方面的音速值是此樹中最高的地方，推估此處的材質可能是最好的，而且內部比外部的音速好。於現場試驗時亦發現此樹尚可結果實，表現其生長狀態還是很正常。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 28.1±5.11 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 16 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 40 MPa/cm^2，微破壞壓縮強度由樹皮處往內 5 公分後開始下降，15 公分處出現最低的強度，之後強度再慢慢上升，故由微破壞壓縮強度和標準試片的縱向壓縮強度的高相關性而言，芒果老樹的木材壓縮強度也與微破壞的壓縮強度相當。而由微破壞壓縮強度的圖顯示的結果與音波的斷面圖推估相符，亦即內部比外周材質為佳，而樹芯鑽出後無不良的狀況。

3.后里三光路刺桐



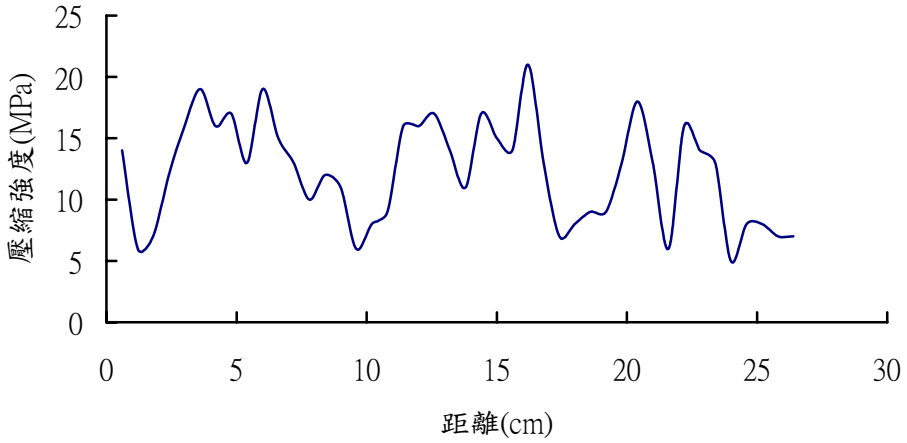


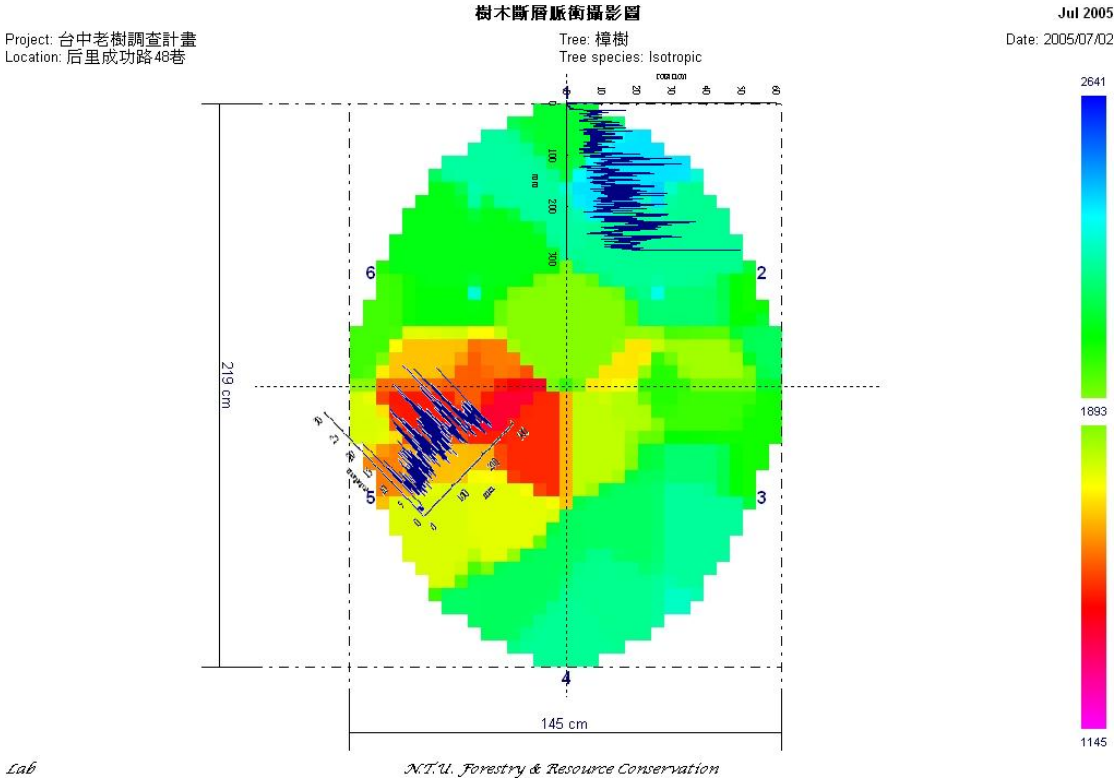
圖 17 后里三光路刺桐樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

老樹的胸高直徑為 130 公分，海拔 211 公尺，樹高約 14 公尺，冠幅約 150 m^2，此老樹外圍有凸出的樹瘤。平均音波速度為 648±175.5 m/s，再依整體的音波斷面 17 圖顯示，整株樹木最低的音速是 480 m/s 左右，最高的音速為 1036 m/s 左右，只有在西方的外圍是最好的，但整株的音速值都不高，音速越小則表示其材質可能越差，同時以鑽孔抵抗而言，5 號外圍的抵抗高而往樹心則降低，2 號方向則阻抗值整體非常低，所以近乎無抵抗，故此老樹的內部品

質可能不好，強度也可能比較小。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 12.2±4.16 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 5 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 21 MPa/cm^2，整體的微破壞壓縮強度數值很低，故由微破壞壓縮強度和標準試片的縱向壓縮強度的高相關性而言，老樹的木材壓縮強度也與微破壞的壓縮強度相當。而由微破壞壓縮強度的圖顯示的結果與音波的斷面圖推估相符，亦即內部比外周材質為佳，而樹芯鑽出後的狀況，則容易斷裂，此可能和其強度比較差，所以在取出樹芯的過程中，樹芯易受損。

4.后里成功路 48 巷樟樹



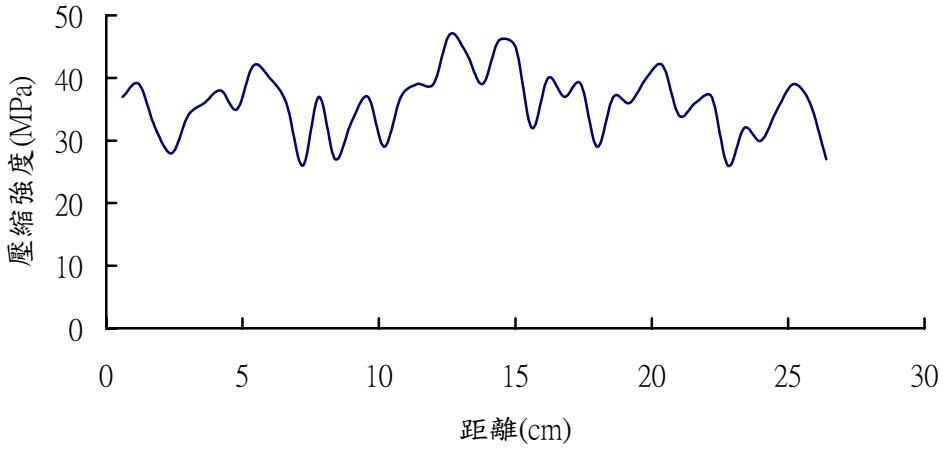
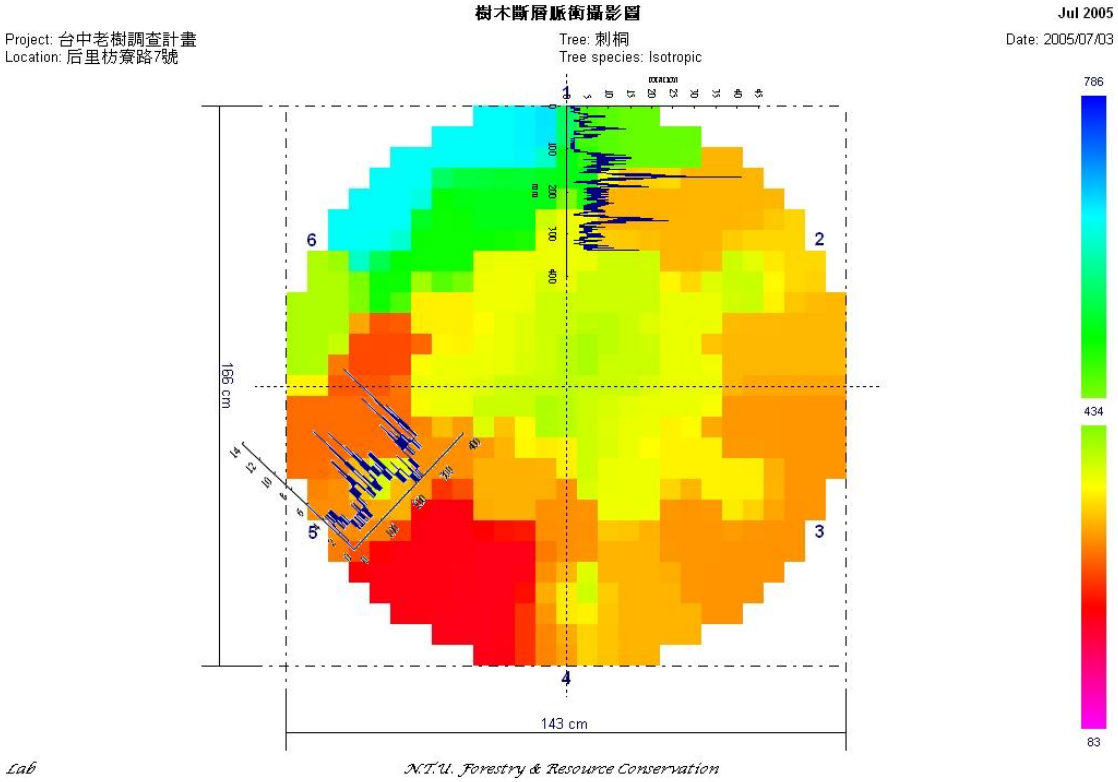


圖 18 后里成功路樟樹樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

樟木老樹的胸高直徑為 167 公分，海拔 230 公尺，樹高約 30 公尺，冠幅約 300 m^2，於當地又有日月神木的稱號。平均音波速度為 1988±239.9 m/s，再依整體的音波斷面圖 18 顯示，整株樹木在 5 號(西南方)方面往髓心的位置處比樹木的其他方向音速低，但最低的音速也在 1385 m/s 以上，所以此棵神木的腐朽或空洞率不明顯，用鑽孔抵抗後顯示其抵抗值很正常並無腐朽現象，此項結果與音波推估的結果可以相輔證，此株老樹除了 5 號方向外，其餘的地方應該材質上無明顯的劣化現象。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 36.2±5.17 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 26 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 47 MPa/cm^2，故由微破壞壓縮強度和標準試片的縱向壓縮強度的高相關性而言，日月神木的木材壓縮強度也與微破壞的壓縮強度相當。而由微破壞壓縮強度的圖顯示的結果與音波的推估相符，而由強度的觀點而言，日月神木強度都維持 26 MPa/cm^2 以上，而由外到內強度變化不大，亦即內外的強度差不多，所以目前此老樹的材質狀況是很正常的範疇，同時樹芯的狀況良好，無腐朽或空洞的情形存在。

5.后里坊寮路 7 號刺桐



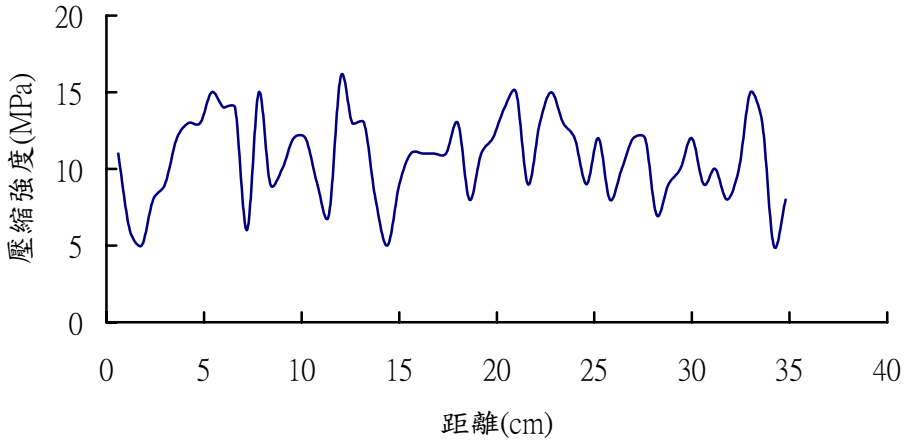


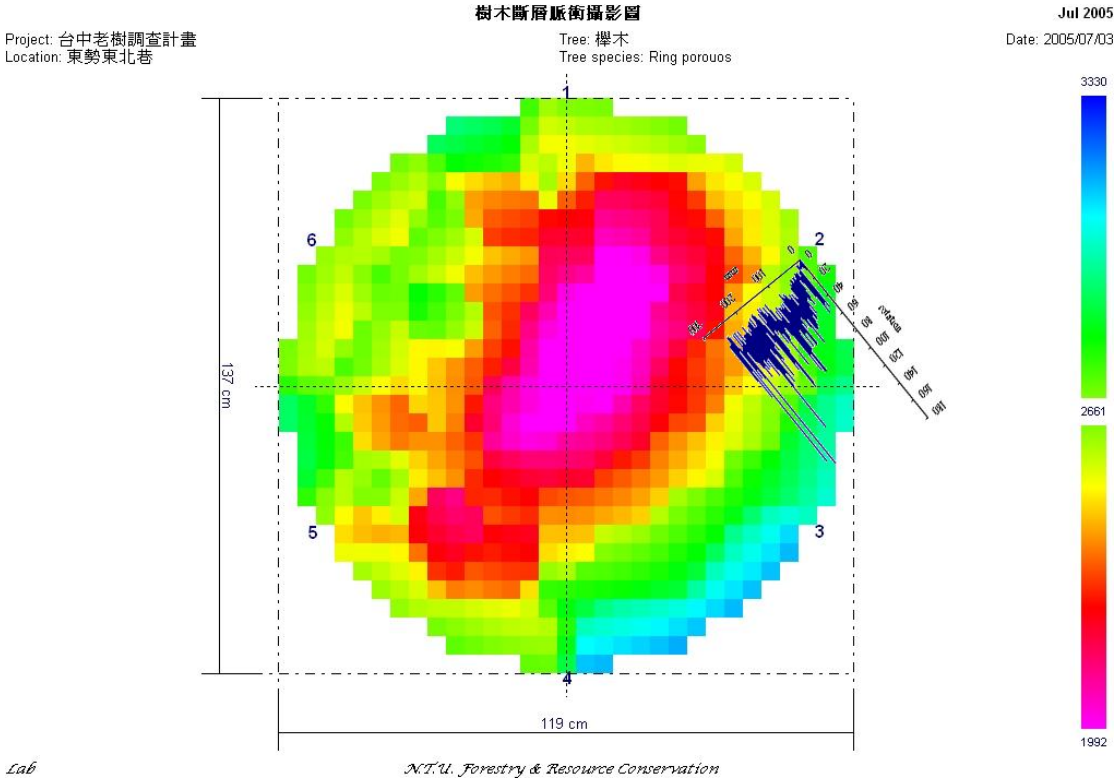
圖 19 后里坊寮路刺桐樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

老樹的胸高直徑為 165.5 公分，海拔 213 公尺，樹高約 15 公尺，冠幅約 100 m^2，此老樹外圍有凸出的樹瘤，樹上有蜂巢，也有螞蟻等昆蟲在樹上活動，南方的有大的樹洞存在，樹旁的水渠有正隆紙廠的排放水。平均音波速度為 363±98.1 m/s，再依整體的音波斷面圖 19 顯示，整株樹木，最高的音速為 659 m/s 左右，只有在東北方的外圍是最好的，但整株的音速值都非常低，一般空氣的傳遞速度為 343 m/s 左右，此老樹的音速只比空氣的音速快一點，音速越小

則表示其材質可能越差，同時以鑽孔抵抗而言，5 號方向的阻抗值不僅低而且有腐朽的現在，1 號方向則阻抗值整體不高，同時有腐朽的情形，故此老樹的內部品質可能很不好，強度也可能比較不高。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 10.7±2.78 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 5 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 16 MPa/cm^2，整體的微破壞壓縮強度數值很低，故由微破壞壓縮強度和標準試片的縱向壓縮強度的高相關性而言，老樹的木材壓縮強度也與微破壞的壓縮強度相當。而由微破壞壓縮強度的圖顯示的結果與音波的斷面圖推估相符而樹芯鑽出後的狀況，則為一段一段的腐朽樹芯，由所取的刺桐老樹狀況而言，可能此樹種的材質經過時間的洗禮後，材質易出問題，故對此樹種應再加以監控其生長情形，特別是當颱風或經歷極端狀況後。

6.東勢東北巷欒木



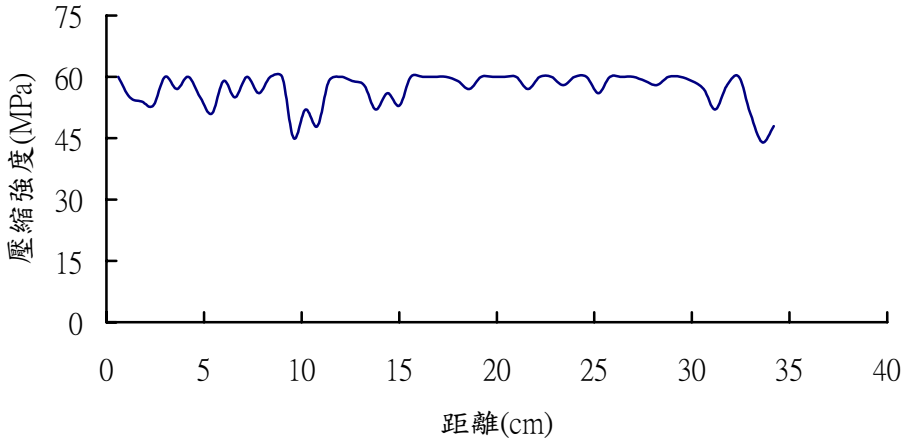
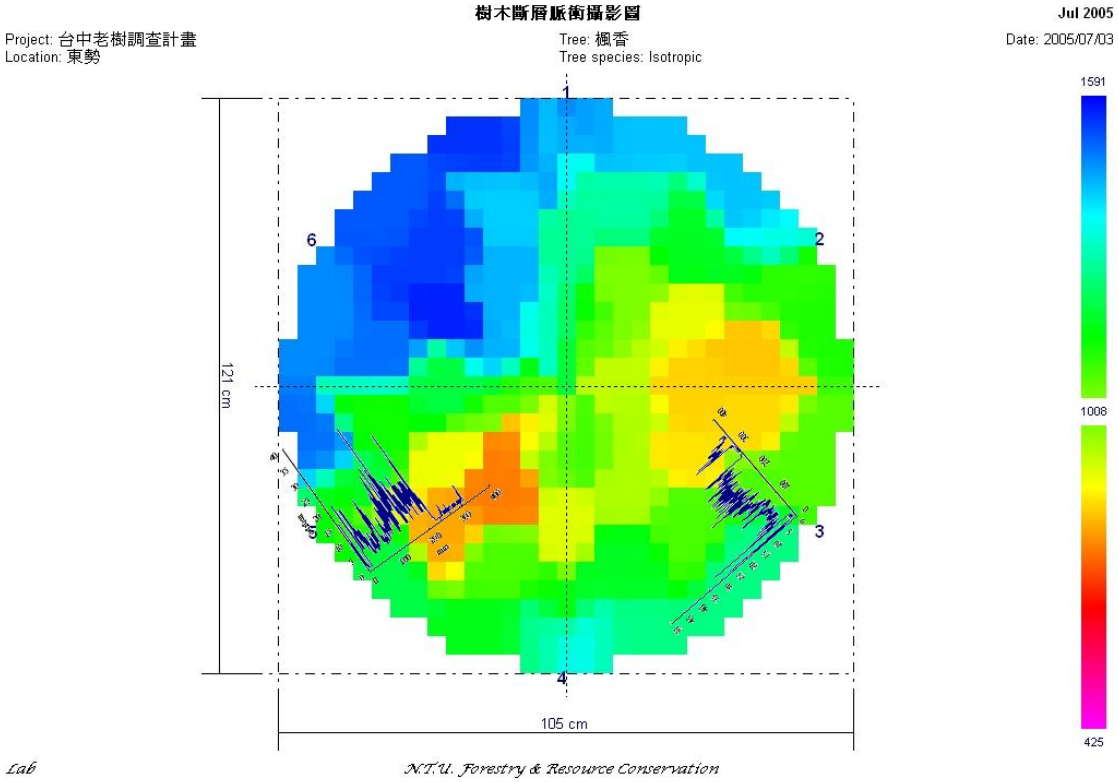


圖 20 東勢東北巷櫸木樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

櫸木老樹的胸高直徑為 137 公分，海拔 446 公尺，樹高約 25 公尺，冠幅約 500 m^2。平均音波速度為 2535±253.5 m/s，再依整體的音波斷面圖 20 顯示，整株樹木最低的音速是 2070 m/s 左右，最高的音速為 3135 m/s 左右，整體的音速值非常高，表現出其內部材質無問題，同時利用鑽孔抵抗來加以驗證，發現此鑽孔抵抗的值都很高，且無腐朽的現象存在。因此由此可推知，此櫸木老樹的強度應該很好。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 57.1 ±4.04 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 44 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 60 MPa/cm^2 以上，整體的微破壞壓縮強度數值很高，而由微破壞壓縮強度的圖顯示的結果與音波的斷面圖推估相符，樹芯鑽出後的情形沒有不良的狀況，故推斷此老樹的生長狀況與內部材質都很正常，而且此老樹為櫸木其密度又相當高，密度與縱向壓縮強度有正相關，因此櫸木有高的壓縮強度是很合理的情形，本次檢測的結果也可驗證此論點。

7.東勢楓香



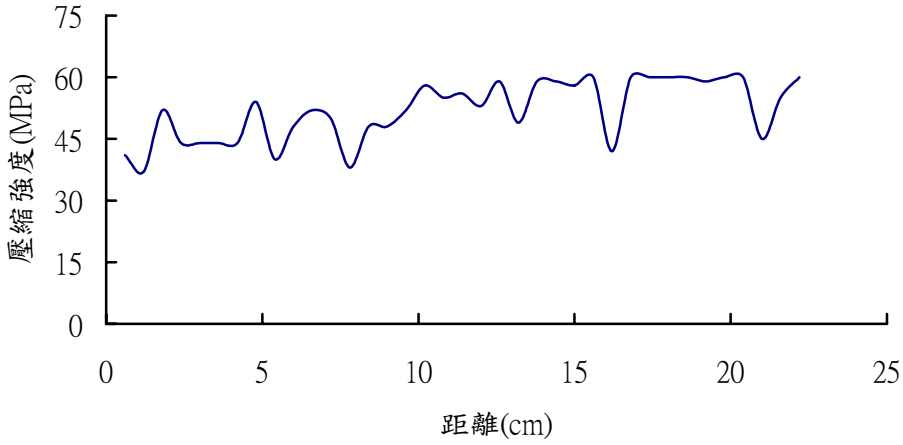


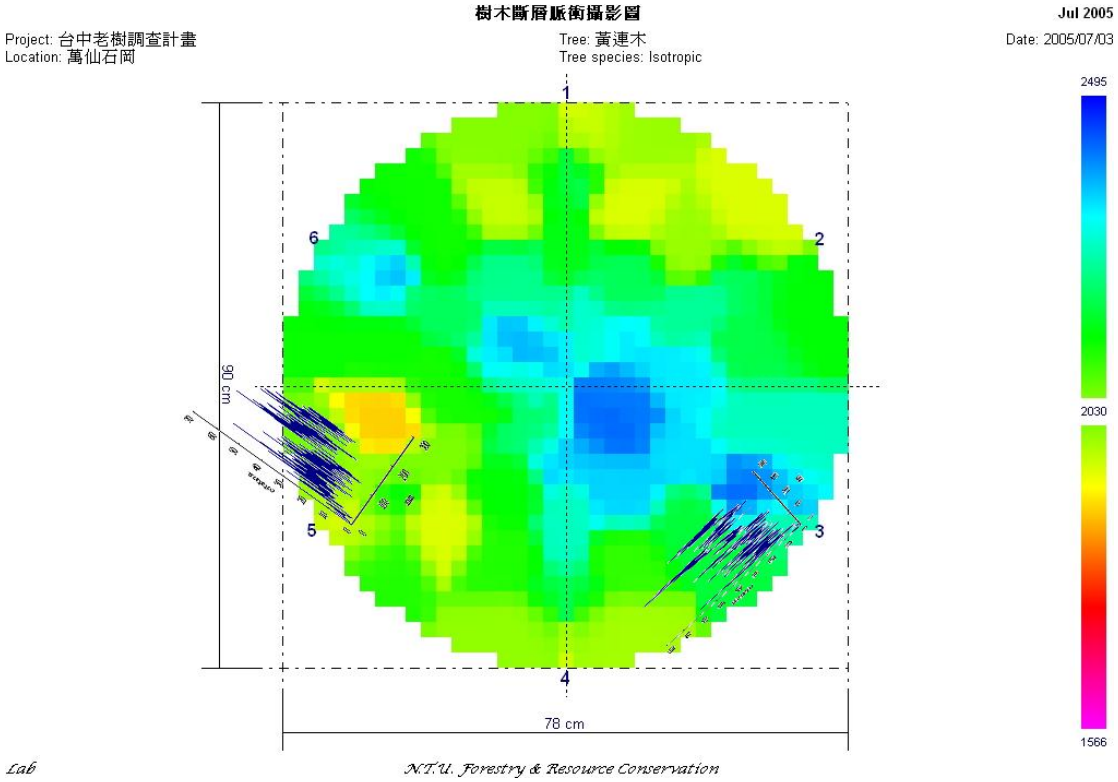
圖 21 東勢楓香樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

東勢的楓香老樹的胸高直徑為 121 公分，海拔 429 公尺，樹高約 20 公尺，冠幅約 200 m^2，此樹旁邊有水渠的經過。平均音波速度為 1196±216.3 m/s，其最低的音波數值為 791 m/s，再依整體的音波斷面圖 21 顯示，整株樹木在 3 號(南方)與 5 號(西南方)方面靠近樹皮的地方音波的波速較高，用鑽孔抵抗發現此樹在探針的範圍內，其在靠近樹心有空洞的現象，與音波的斷面圖所顯示的結果很相

似，而 1 號和 6 號方面的音速值是此樹中最高的地方，推估此處的材質可能是最好的，而且內部比外部的音速差。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 52±7.3 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 40 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 60 MPa/cm^2 以上，而所取出的樹芯有一處腐朽的跡象，但是腐朽率約是 8%，但是未腐朽的部份其強度都保持在 40 MPa/cm^2 以上，所以又腐朽的範圍不大，所以其就強度而言並沒有太大的問題，但是對於已經空洞或腐朽的部分要加以處理，進行內部補強與滅菌的處理行為。

8.石岡萬仙黃連木



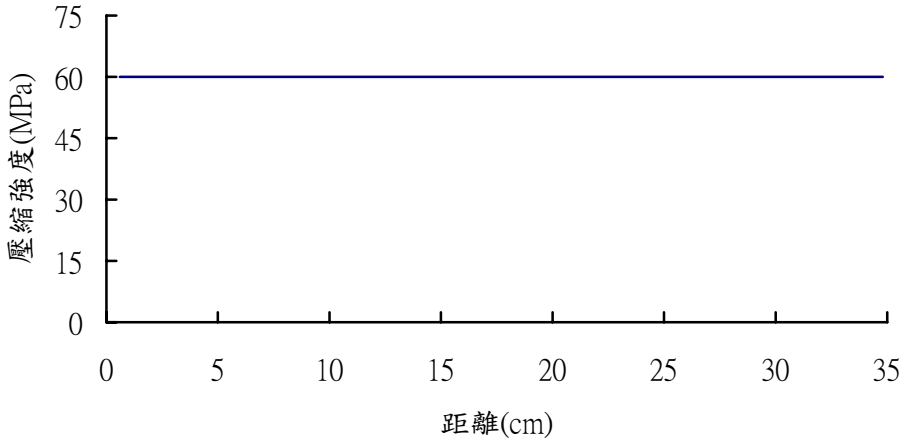
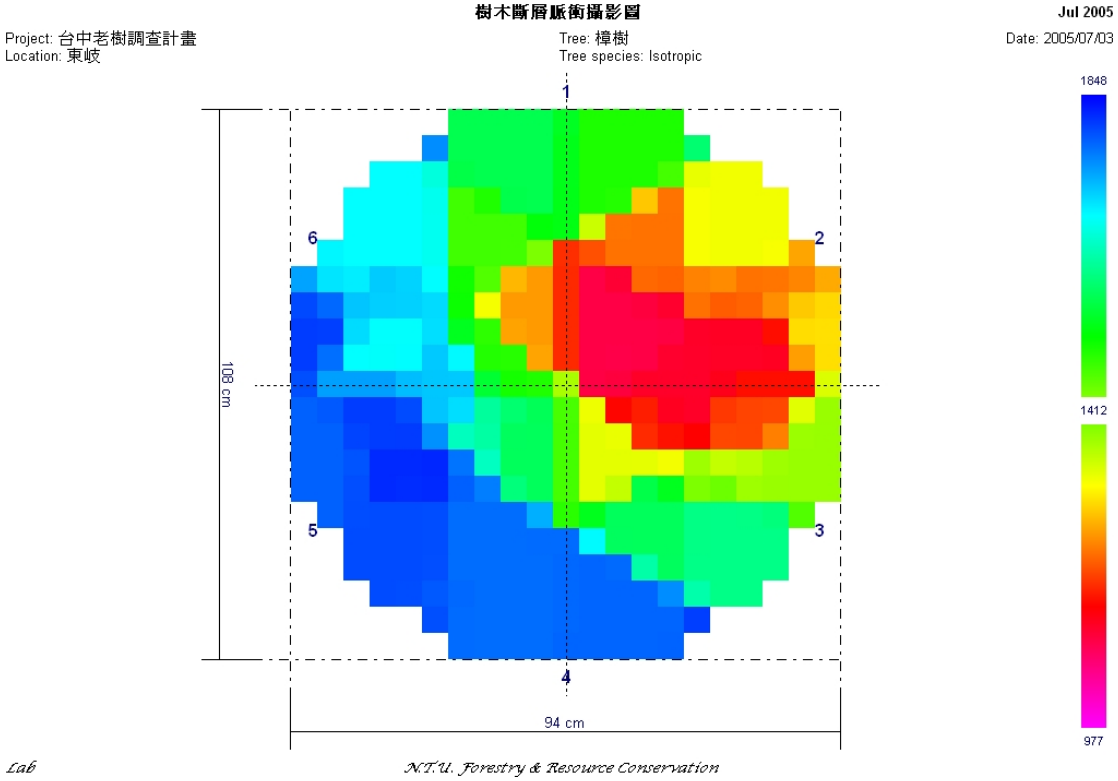


圖 22 石岡萬仙黃連木樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

石岡的黃連木老樹的胸高直徑為 82.8 公分，海拔 353 公尺，樹高約 20 公尺，冠幅約 300 m^2，此樹旁邊有水渠的經過。平均音波速度為 2142±124.1 m/s，其最低的音波數值為 1904 m/s，再依整體的音波斷面圖 22 顯示，整株樹木在 5 號(西南方) 附近方向音波的波速較低但還在 1900 m/s 以上，如以音波推論應無腐朽空洞，用鑽孔抵抗發現此樹在探針的範圍內，其內部裁質無任何的空洞或腐朽現象，此與音波的斷面圖所顯示的結果相互應證，而 3 號往 6 號方面的音速值是此樹中最高的地方，推估此處的材質可能是最好的，同時黃連木是闊特級木，其密度也很高，因此其材質強度應該也會不錯。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，平均的壓縮強度 60 MPa/cm^2 以上，所以其就強度而言並沒有問題，同時再次印證音波速越快則其強度也越強，因此由微破壞壓縮試驗來看音波斷面圖，顯示音波斷面評估材質是有其可信賴度的方式。黃連木老樹其生長狀況也是良好的情形，所以此老樹是健康無虞的。

8.東岐樟樹



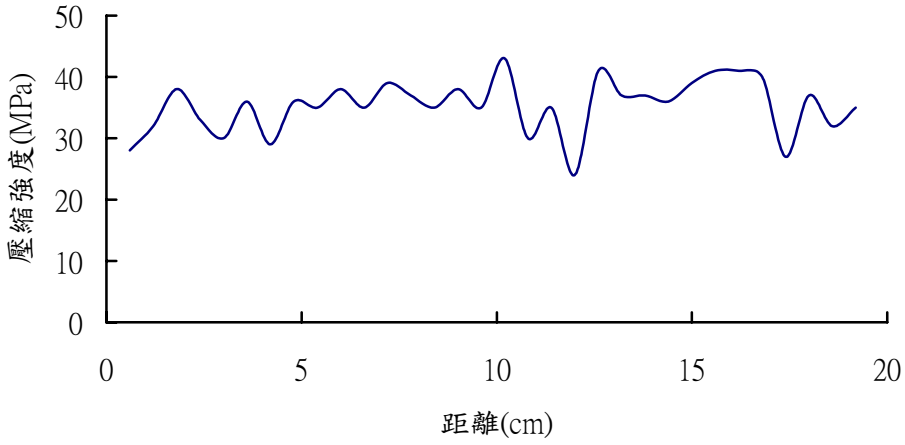


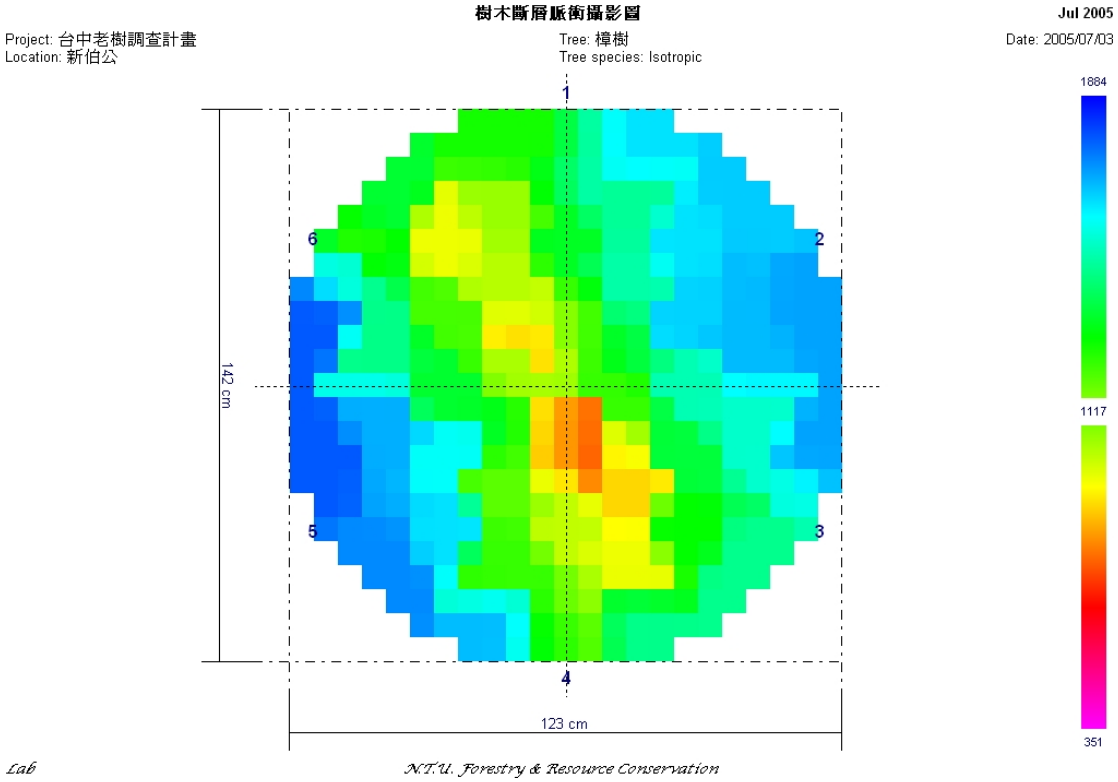
圖 23 東岐樟樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

樟木老樹的胸高直徑為 108 公分，海拔 393 公尺，樹高約 13 公尺，冠幅約 200 m^2，旁邊有顆大石，另一邊為民宅。平均音波速度為 1514±229.4 m/s，再依整體的音波斷面圖 23 顯示，整株樹木在 2 號(東北方)方面往樹心的位置處比樹木的其他方向音速低，但最低的音速也在 1100 m/s 以上，而 4 號和 5 號方面的音速值是此樹中最

高的地方，這樣的結果可能是因為 2 號的位置因樹木的生長所產生反應材所致，所以 2 號的位置音波比較低，但不能因此斷言此處已經有空洞與腐朽的現象存在。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，壓縮強度除了在距樹皮 12 和 17 公分比較低外，其他的壓縮數值都在平均值上下變動不大，平均的壓縮強度 35.3±4.38 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 24 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 43 MPa/cm^2，而鑽出的樹芯尚無腐朽的現象，且強度也屬正常的範疇，故此樟木老樹目前無重大的強度衰退的問題。

9.新伯公樟樹



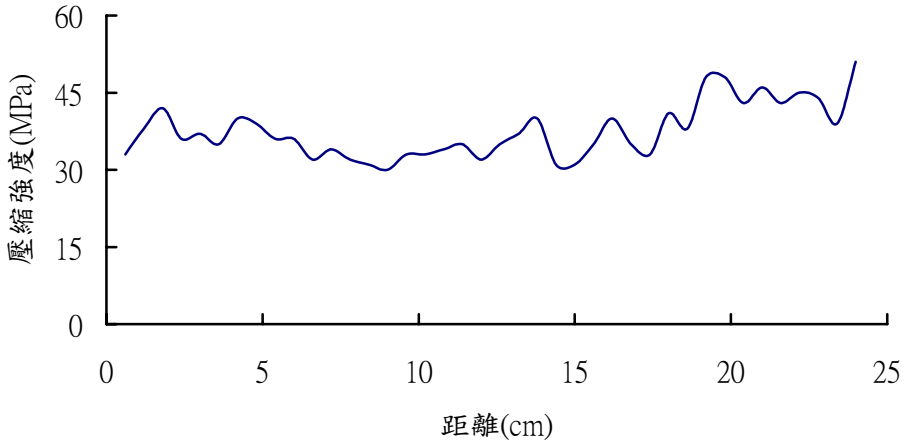


圖 24 新伯公樟樹樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

新伯公樟木老樹的胸高直徑為 141.6 公分，海拔 393 公尺，樹高約 19 公尺，冠幅約 250 m^2，在此老樹發現有白蟻的蹤跡，而樹幹通直。平均音波速度為 1394±250.4 m/s，再依整體的音波斷面圖 24 顯示，整株樹木在 4 號(南方)方面靠近樹心的位置處比樹木的其他方向音速低，最低的音速也在 777 m/s 左右，此項結果與音波推估的結果相符，而 2 號、3 號、5 號和 6 號方面的音速值是此樹中高的地方，推估此處的材質可能是最好的。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，壓縮強度由樹皮的位置向樹心的方面都差不多但在 17 公分後強度開始上揚，平均的壓縮強度 37.5±5.26 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 30 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 51 MPa/cm^2，所以壓縮強度表現上實屬正常，而鑽取的樹芯並無顯著的腐朽或斷裂等缺點。

10.關東路下方榕樹

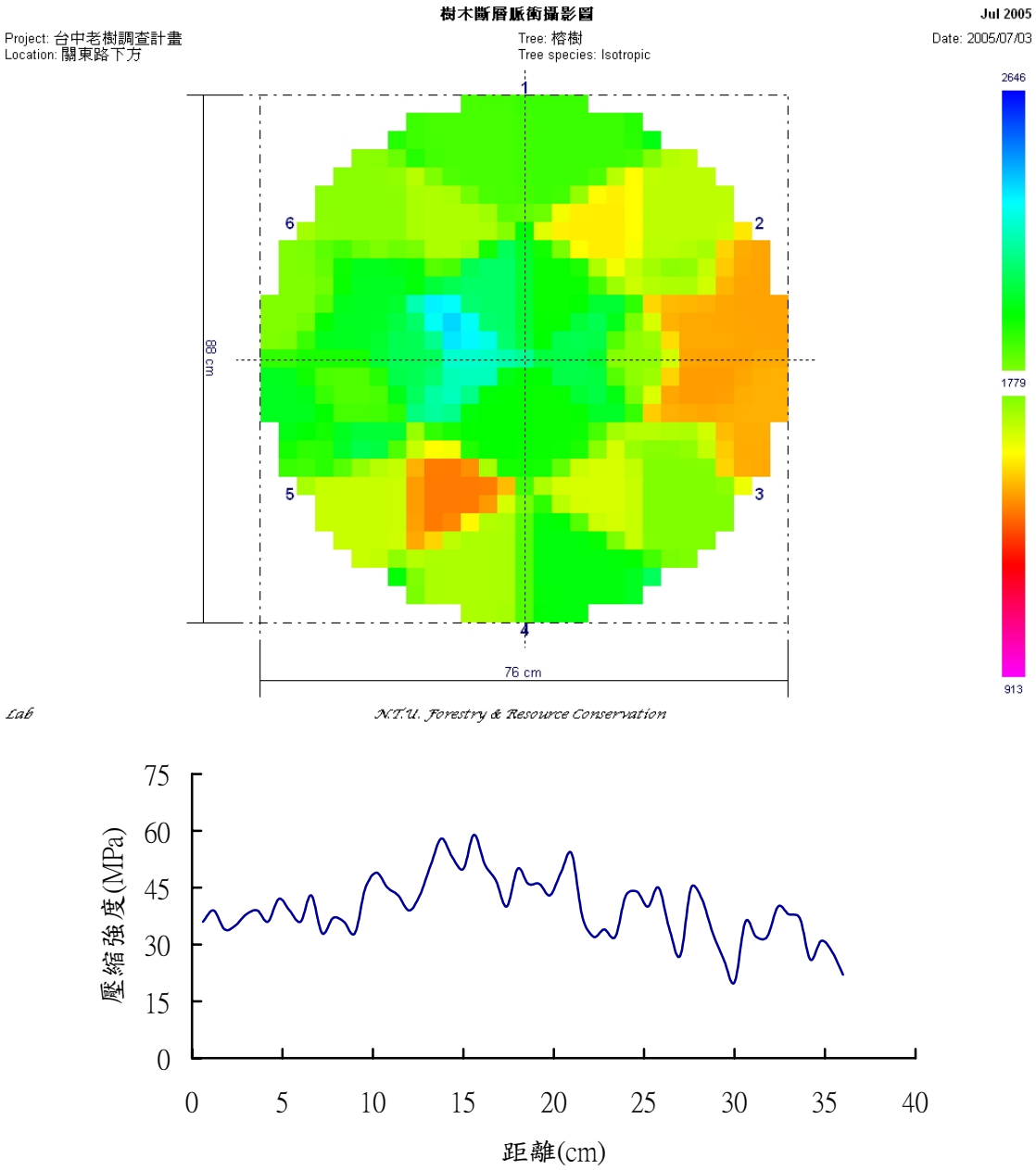


圖 25 關東路下方榕樹木斷層攝影掃瞄及因素分析壓縮強度

東關路 290 號的榕樹老樹(下方)的胸高直徑為 87.8 公分，海拔 430 公尺，樹高約 15 公尺，冠幅約 200 m^2，而樹幹通直。平均音波速度為 1803±185.5 m/s，再依整體的音波斷面圖 25 顯示，整株樹木在 2 號和 3 號的方面靠近樹皮的位置處比樹木的其他方向音速低，最低的音速也在 1483 m/s 左右，靠近樹心的地方音速值比較高，推估此處的材質可能是最好的。

利用生長錐所鑽取的樹芯調濕後(mc:12%)進行微破壞縱向壓縮強度而言，壓縮強度由樹皮的位置向樹心的方面在 12 公分左右達到

最大值後，強度開始慢慢下降，平均的壓縮強度 39.6±8.26 MPa/cm^2，最低的壓縮強度為 20 MPa/cm^2，最高的壓縮強度為 59 MPa/cm^2，所以壓縮強度表現上實屬正常，而鑽取的樹芯並顯著的腐朽或斷裂等缺點，但是經過調濕後，樹芯表面有菌絲產生，所有推論可能內部初部受到感染還不是很嚴重，故應處理避免老樹遭到更深的傷害。

表 2 台中縣市珍稀老樹樹幹腐朽率摘要表

編碼	樹種	樹高（m）	DBH（cm）	130cm 斷面音波速度 （m/s）			130cm 斷面壓縮強度（Mpa/cm^2）			130cm 斷面腐朽率(%)
				Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	
06-0006	樟樹	20	142	1926±719.6	812	3909				2.75
06-0008	樟樹	19	141.6	1394±250.4	777	1781	37.5±5.26	30	51	2.2
06-0013	樟樹	17	132	1629±145.7	1330	2271	28.3±5.06	16	43	0
06-0015	樟樹	30	167	1988±239.9	1385	1913	36.2±5.17	26	47	0
06-0026	樟樹	13	108	1514±229.4	1100	1796	35.3±4.38	24	43	0
06-0003	芒果	13	132	1520±193.2	986	1965	28.1±5.11	16	40	1.05
06-0018	芒果	20	174	864±368.5	461	1744				64.45
19-0008	芒果	12	91.5	1970±153.1	1700	2360				0
19-0009	芒果	12	61	1832±173.2	1521	2093				0
19-0010	芒果	12	53.5	1106±602.9	164	2260				42.04
19-0011	芒果	12	82	1762±265.9	1277	2349				0
19-0012	芒果	12	75.5	2107±224.2	1751	2821				0
19-0013	芒果	12	60.5	1897±70.8	1722	1998				0
19-0014	芒果	12	45.5	2005±100.1	1866	2219				0
19-0001	茄苳	13	99	2576±328.9	1968	3218				0
19-0017	茄苳	20	104	2262±240.1	1659	2764				0

由表 2 亦可知，當在同一樹種下，如果有腐朽的現象時，其標準差比未腐朽的來的大，此是因為當發生腐朽時，會產生空洞，而空洞的音波值約 340 m/s，故會增大的音波速度的離散性，所以音波速度除了會因有空洞而降低外，標準差也會變大。

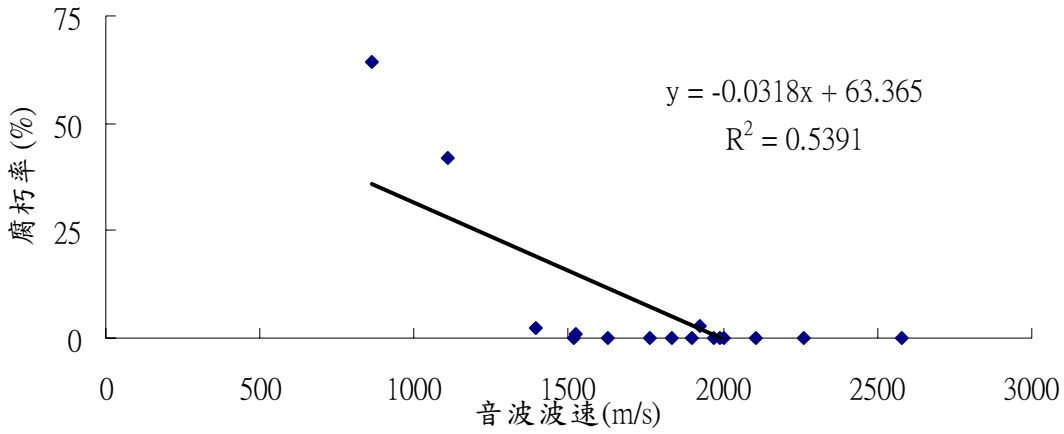


圖 26 音波波速與腐朽率之相關圖

以音波波速與腐朽率的相關圖而言，平均音波波速越大者，其腐朽率越低，而正常的老樹的音波波速在 1500~2200 m/s 的範圍內，其相關式為腐朽率=-0.0318 音波波速+63.365，R^2=0.5391**，故腐朽率和音波波速呈現高度負相關。

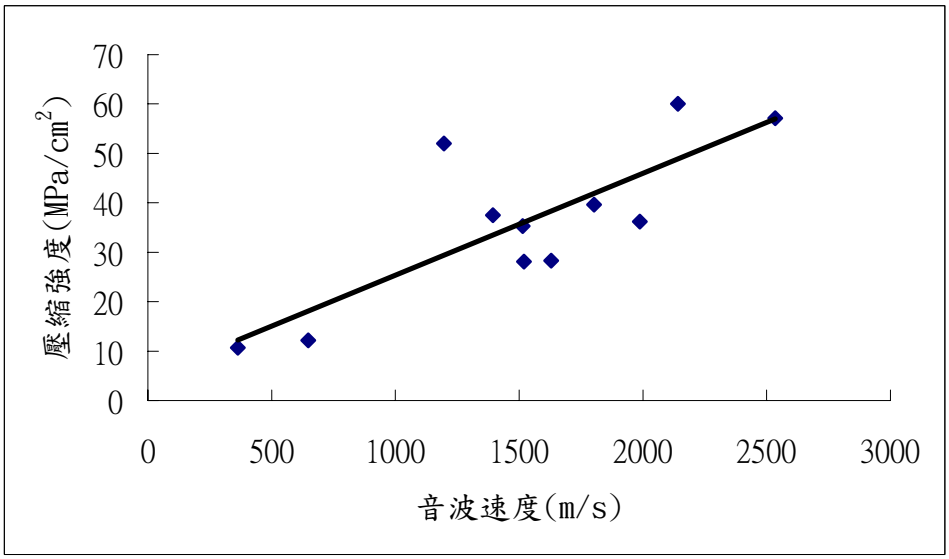


圖 27 微破壞縱向壓縮與音波速度相關圖:

微破壞縱向壓縮與音波速度有直線的關係式:壓縮強度=0.0206×音波速度＋4.7779　R^2=0.6383**兩者間有顯著的正相關，因此顯示出運用音波來推估強度是可以信賴的，同時也證明是可以

利用非破壞的音波檢測老樹材質。同時也表示音波速度越小則縱向壓縮強度越弱，音波速度越高則縱向壓縮強度越強。

Ⅱ樹木健康度檢測

本研究衰退度測定評價乃依據樹勢、樹形、枝的伸長量、枝梢端枯損、枝葉密度、樹皮的狀態之各項目的評價合計除以評價項目數，並將衰退度分成良(<0.8)、稍微不良(0.8~1.6)、不良(0.6~2.4)、明顯不良(2.4~3.2)、快要枯死(3.2 以上)五級，腐朽率評估健康度(分成四級)，藉由衰退度與健康度之平均值來做出總合評價分成健全、需注意、要注意、危險四級。

總評價一級健全有 1 株，編號 060012 榕樹；總評價二級需注意有 19 株,總評價三級要注意有 6 株,分別為編號 060004 龍眼、060005 樟, 060009 榕樹, 060014 榕樹, 060016 榕樹, 060018 芒果，四級危險有 2 株，分別為編號 0600010 莿桐、0600011 莿桐，而編號 060004 龍眼幹部裂成兩半因此危險度亦高。

台中縣老樹由表 3 得知，外觀評估之衰退度三級不良者有編號 060004 龍眼、060005 樟樹、060006 樟樹、060008 樟樹、060009 榕樹、060010 莿桐、060011 刺桐、060014 榕樹、060025 櫸木共計 9 株；以腐朽空洞健康度評價三級計有 1 株為編號 060018 芒果，健康度評價四級有編號 060010 莿桐、060011 刺桐、060016 榕樹，計 3 株。編號 060004 龍眼因幹分裂成兩叉與編號 060005 樟樹因幹材過大與榕樹很多因氣生根過多之因素而無法進行空洞腐朽雷達檢側。

編號 060008 新伯公樟有白蟻;編號 060024 楓香水泥覆蓋根上，且旁馬路砂石車來往頻繁；編號 060026 東崎街樟樹長斜的，且一半伸入民宅。

表 3 台中縣老樹巨木衰退度與健康度之評估表

編號	樹種	樹勢	樹形	枝的伸長量	枯損等被害		枝葉密度	樹皮的狀態	衰退度	健康度	總評價
台中縣					梢端	枝端					
060001	玉蘭花	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
060002	黃蓮木	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2
060003	芒果	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2
060004	龍眼	2	2	2	1	1	1	4	3		3
060005	樟	1	1	3	2	2	2	1	3		3
060006	樟	1	2	3	2	2	1	2	3	1	2
060007	榕樹	1	1	1	2	2	1	2	2		2
060008	樟	1	2	2	2	2	1	2	3	1	2
060009	榕樹	1	2	1	2	2	2	2	3		3
060010	莿桐	1	1	2	1	1	1	4	3	4	4
060011	莿桐	1	1	2	1	1	4	4	3	4	4
060012	榕樹	0	0	1	1	1	0	1	1		1
060013	樟樹	1	1	3	1	1	1	1	2	1	2
060014	榕樹	2	2	2	2	2	2	2	3		3
060015	樟樹	1	1	3	1	1	1	1	2	1	2
060016	榕樹	0	1	1	1	1	1	1	2	4	3
060017	榕樹	0	0	2	1	1	0	1	1	2	2
060018	芒果	1	1	0	2	2	3	1	2	3	3
060019	黃蓮木	1	1	0	1	1	1	3	2	1	2
060020	榕樹	1	2	2	1	1	1	1	2		2
060020	榕樹	1	2	2	1	1	1	1	2		2
060021	榕樹	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2
060022	榕樹	1	1	1	1	1	1	2	2		2
060023	榕樹	0	1	3	1	1	0	2	2		2
060024	楓香	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
060025	櫸木	1	2	2	2	2	1	1	3	1	2
060026	樟樹	1	2	2	2	2	2	2	3	1	2
060027	榕樹	1	1	3	1	1	0	1	2		2

台中市由表 3(續)得知，外觀評估之衰退度三級不良者有 1 株，編號 190011 芒果；以腐朽空洞健康度評價三級有 2 株，分別為編號 190003 榕樹、190015 榕樹。

總評價一級健全有 5 株，分別為編號 190001 茄苳,190007 榕樹,190013 芒果,190016 榕樹,190017 茄苳。總評價二級需注意有 11 株，總評價三級要注意有 1 株為編號 190003 榕樹。

表 3 台中市老樹巨木衰退度與健康度之評估表(續)

編號 樹種 台中市	樹勢	樹形	枝的伸長量	枯損等被害 梢端	枯損等被害 枝端	枝葉密度	樹皮的狀態	衰退度	健康度	總評價
190001 茄苳	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
190002 榕樹	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
190003 榕樹	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3
190004 榕樹	0	1	1	1	1	0	1	1	2	2
190005 榕樹	1	1	3	1	1	1	1	2	1	2
190007 榕樹	0	0	1	0	0	0	1	1		1
190008 芒果	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
190009 芒果	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2
190010 芒果	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
190011 芒果	2	2	1	1	1	3	1	3	1	2
190012 芒果	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
190013 芒果	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
190014 芒果	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2
190015 榕樹	0	0	1	1	1	0	1	1	3	2
190016 榕樹	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
190017 茄冬	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
190018 荔枝	1	2	2	1	1	0	1	2	1	2

Ⅲ樹齡估測

台中縣縣市政府列於資料庫內之老樹計 44 株，已完成檢測有 37 株，老樹巨木樹齡因半徑長度及未取樣部分至髓心長度的樹輪寬窄隨時間變化速率二個重要參數難以準確估算，目前已發展較為有效估測髓心及半徑長度之方法。求得各樹種 di 值分別玉蘭花 1.10、芒果 1.10、茄苳 1.39、荔枝 0.95、黃蓮木 1.41、楓香 1.31、榕樹 1.11、樟樹 1.29、龍眼 0.95、櫸木 1.27。(如表 4)

台中縣老樹榕樹計有 10 株推估年齡介於 105~262 之間，資料庫樹齡記載為 100-200 年，最多低估 45 年，最多高估 62 年；樟樹計有 4 株年齡估算介於 198~342 之間，而資料庫記載約為 200-300 年間，最多低估 102 年，最多高估 142 年；黃蓮木計 2 株推估年齡為 72~63 年，資料庫記載為 130-200 年，因此最多低估 137 年；玉蘭花 1 株推估年齡 123 年，資料庫記載年齡為 160 年，低估 37 年；芒果計 1 株推估 232 年，比資料庫記載為 250 年低估了 18 年；楓香計 1

株推估年齡 224 年，比資料庫記載之 150 年高估 74 年；龍眼計 1 株推估年齡為 104 年，與資料庫記載之 100 年高估 4 年；欒木計 1 株推估年齡為 324 年，與資料庫記載之 150 年高估 174 年。

台中市老樹榕樹計有 7 株推估年齡介於 113~233 之間，資料庫樹齡記載為 110-300 年，最多低估 45 年，最多高估 62 年；芒果計 7 株 84~142 年之間，與資料庫樹齡記載 200 年之推估誤差介於 58-116 年，茄冬計有 2 株推估年齡 52~67 年，資料庫記載為 95-150 年，最多低估 83 年；荔枝計有 1 株推估年齡為 103 年，與資料庫記載 300 年低估 197 年。

本計畫完成之樹芯樣本、樹芯 x-ray 影像、樹芯年輪數、長度及估算方法將一併納入資料庫內提供查閱及參考。

表 4 台中縣市老樹巨木樹芯處半徑、樹芯長、樹芯年齡及估計樹齡摘要表

編號	樹種	半徑 (cm)	樹芯長(cm)	樹芯	c/g	樹輪寬度	估計樹齡	資料庫
台中縣		r	g	年輪數 c		變化速率 di		樹齡
060001	玉蘭花	70.06	30.20	57	1.89	1.10	123	160
060002	黃蓮木	56.85	11.08	19	1.71	1.41	72	130
060004	龍眼	39.01	11.33	29	2.56	0.95	104	100
060005	樟	78.03	36.13	124	3.43	1.29	225	250
060006	樟	114.65	36.36	77	2.12	1.29	198	300
060008	樟	66.88	45.00	158	3.51	1.29	207	300
060009	榕樹	98.73	22.98	30	1.31	1.11	118	100
060012	榕樹	52.55	18.91	59	3.12	1.11	151	100
060013	樟樹	95.06	31.61	139	4.40	1.29	342	200
060014	榕樹	74.84	5.83	9	1.54	1.11	105	150
060016	榕樹	71.66	19.06	42	2.20	1.11	145	170
060017	榕樹	58.92	31.25	91	2.91	1.11	160	150
060018	芒果	95.54	31.72	83	2.62	1.10	232	250
060019	黃蓮木	45.38	29.80	49	1.64	1.41	63	200
060020	榕樹	70.06	38.50	154	4.00	1.11	262	200
060021	榕樹	58.12	10.68	145	13.58	1.11	172	150
060022	榕樹	58.12	32.72	396	12.10	1.11	180	150
060023	榕樹	109.87	41.25	160	3.88	1.11	193	200
060024	楓香	63.06	24.20	105	4.34	1.31	224	150
060025	櫸木	120.38	33.91	111	3.27	1.27	324	150
台中市								
190001	茄苳	51.91	39.72	45	1.13	1.39	52	95
190002	榕樹	61.62	29.50	120	4.07	1.11	233	110
190003	榕樹	35.35	32.80	130	3.96	1.11	137	110
190004	榕樹	132.17	25.20	97	3.85	1.11	263	300
190005	榕樹	38.22	36.70	110	3.00	1.11	113	160
190007	榕樹	62.10	26.00	94	3.62	1.11	208	100
190008	芒果	35.03	40.31	84	2.08	1.10	84	200
190009	芒果	35.03	22.22	72	3.24	1.10	108	200
190010	芒果	35.03	10.76	47	4.37	1.10	142	200
190011	芒果	35.03	29.76	72	2.42	1.10	82	200
190012	芒果	35.03	42.99	96	2.23	1.10	96	200
190013	芒果	35.03	26.87	76	2.83	1.10	95	200
190014	芒果	35.03	20.81	53	2.55	1.10	84	200
190015	榕樹	93.95	34.25	76	2.22	1.11	192	130
190016	榕樹	55.73	39.55	98	2.48	1.11	131	130
190017	茄苳	54.94	33.73	49	1.45	1.39	67	150
190018	荔枝	37.90	13.82	36	2.60	0.95	103	300

Ⅳ.根域範圍探測

（一）台中市茄苳樹王

現況描述：位於台中市區梅川東路旁(圖 28)，該樹極具盛名，已被地方人士視為神樹，樹木範圍已成為獨立公園，並有一座小廟供人祭祀貢奉。接近樹頭之區域地面鋪卵石，地表凹凸不平，其餘地表面以石材鋪設，相當平整。推估主幹有地下根延伸至接近路邊，另外發展成獨立樹幹。

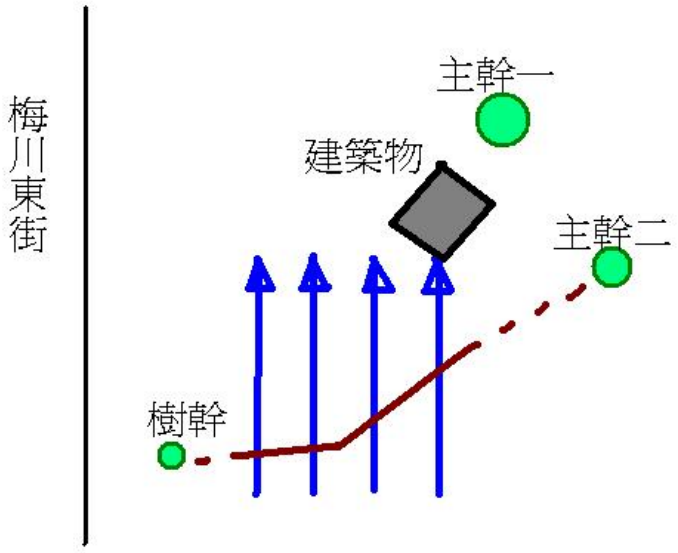


圖 28 茄苳樹王平面圖及探測路徑(藍色)，推估地下根位置(褐色)

探測結果：以 1GHz 天線取四條路徑進行探測(圖 29-1,2.3,4)，在第一、二、三個路徑上看來，雷達回波在淺層看似均勻，但是分別在 5m、3.1m 和 1.2m 處有物體造成不同的回波，第四個路徑回波比較亂，但是可以把 1.1m 處之回波視為有意義，因此可以推估出地下樹根延伸之概略路徑。

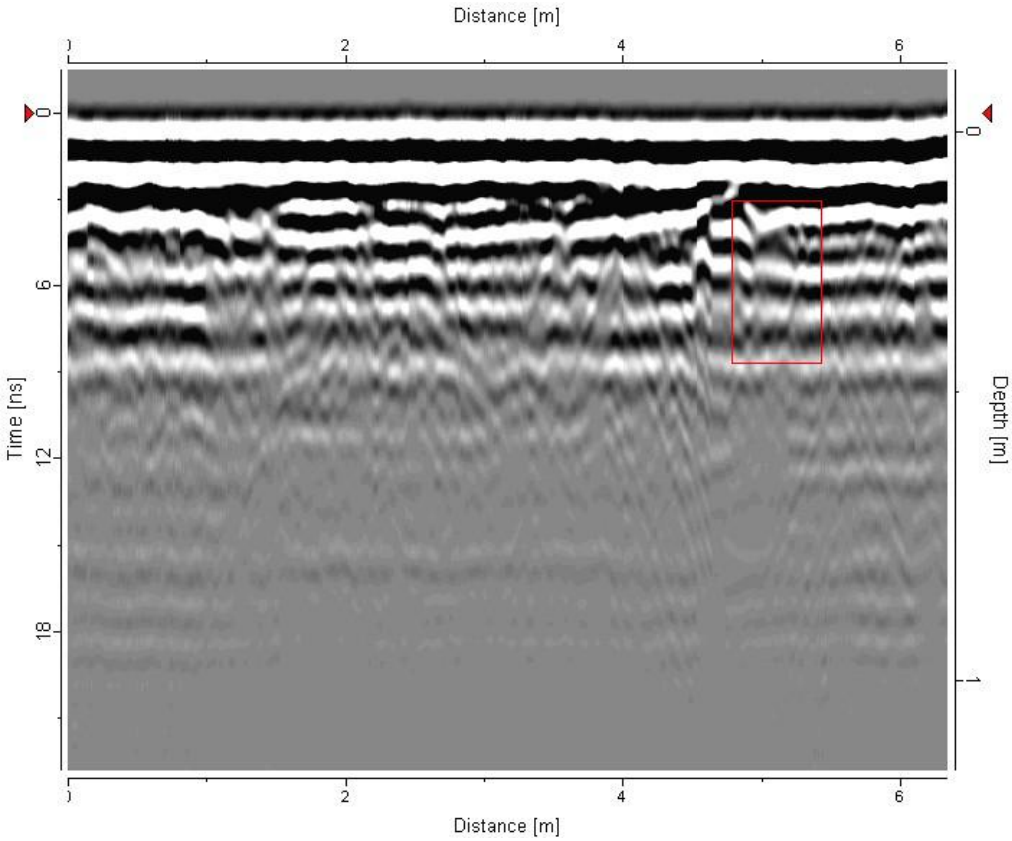


圖 29-1 探測路徑斷層剖面圖（路徑一）

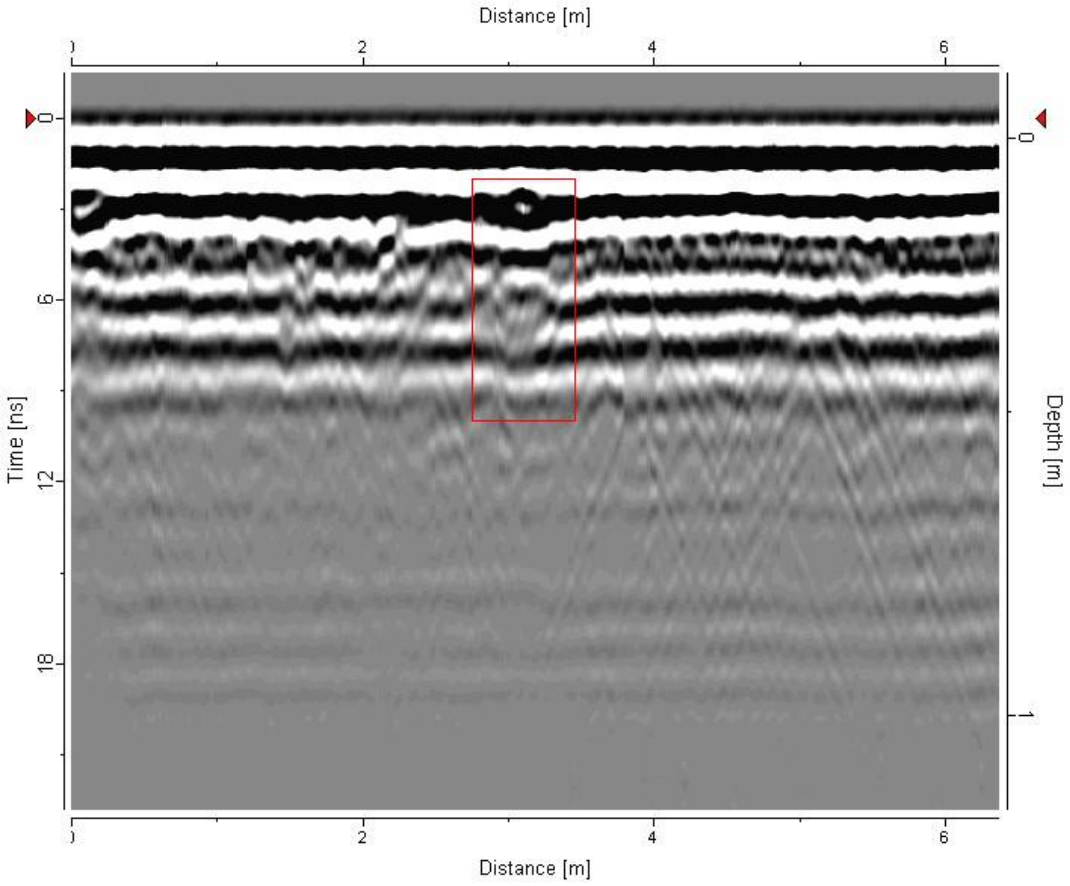


圖 29-2 探測路徑斷層剖面圖（路徑二）

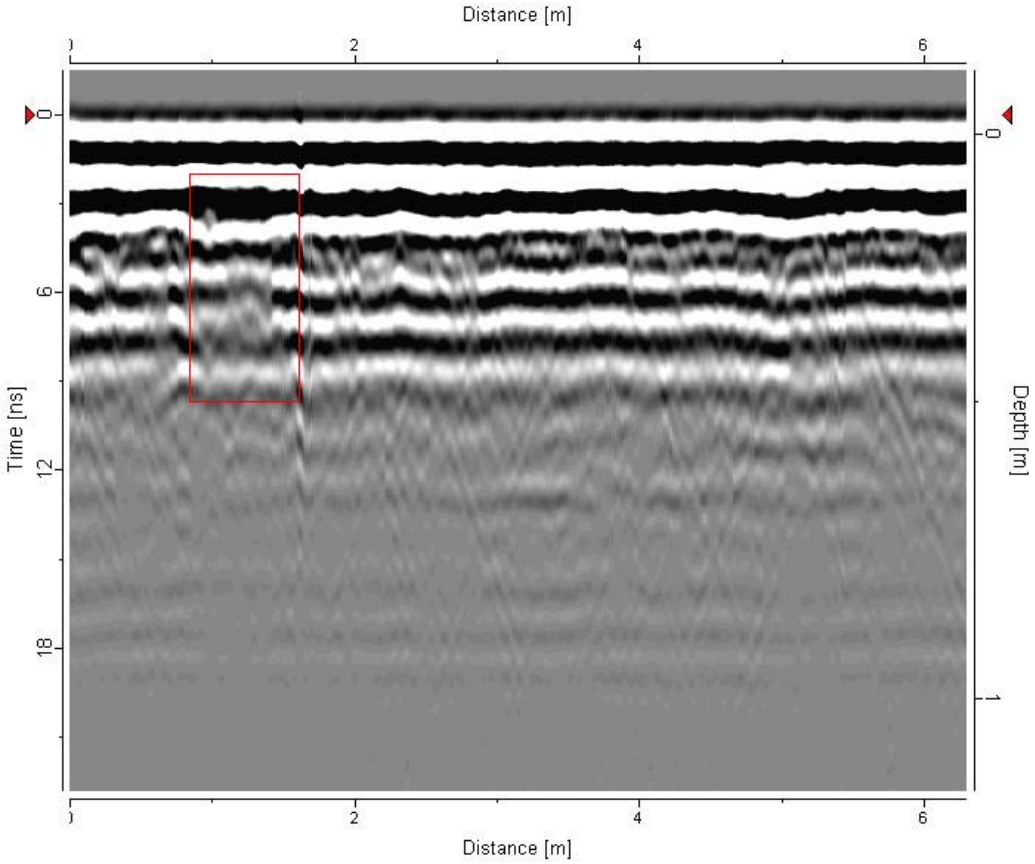


圖 29-3 探測路徑斷層剖面圖（路徑三）

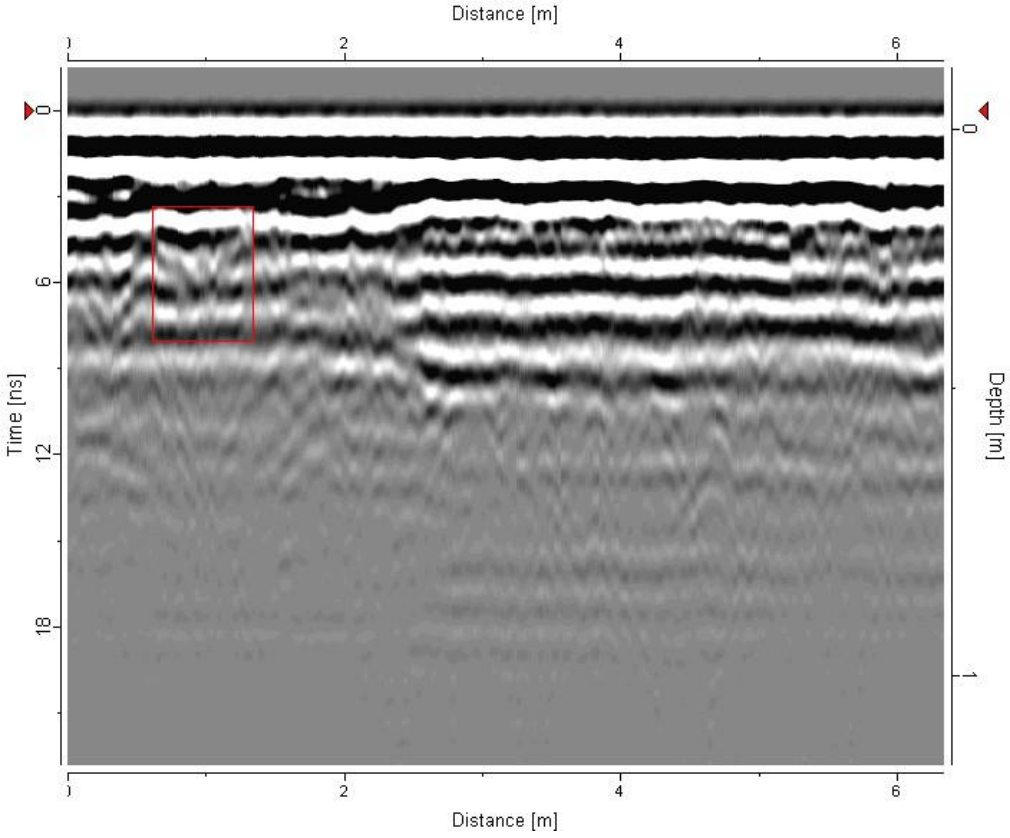


圖 29-4 探測路徑斷層剖面圖（路徑四）

（二）.彰化縣埤頭鄉古榕樹

現況描述：彰化縣埤頭鄉台十九縣公路附近(圖 30)，位於產業道路旁，四周為果園，除樹頭外，地表面兩側以瀝青混凝土加封，樹前方地面鋪設瓷磚。因彰化縣政府正要進行該樹之棲地整理，挖除瀝青混凝土，改鋪設透水磚，故於施工前先進行透地雷達探測，再與開挖結果進行對照。

圖 30 榕樹全景

探測結果以 1GHz 天線進行探測，接近主幹樹頭或大氣根樹頭處，均在淺層(深度 30cm)發現有明顯之紊亂雷達回波(圖 31)；惟在右側舖面接近中央的探測路徑結果中顯示，淺層並無物體造成紊亂回波，似有兩個均勻層造成規則的回波現象。故當場推測，現存表層瀝青混凝土加封下麵應有另一層人工舖面，並依照探測結果指出，絕大多數瀝青混凝土舖面下方淺層位置即有樹根分佈。

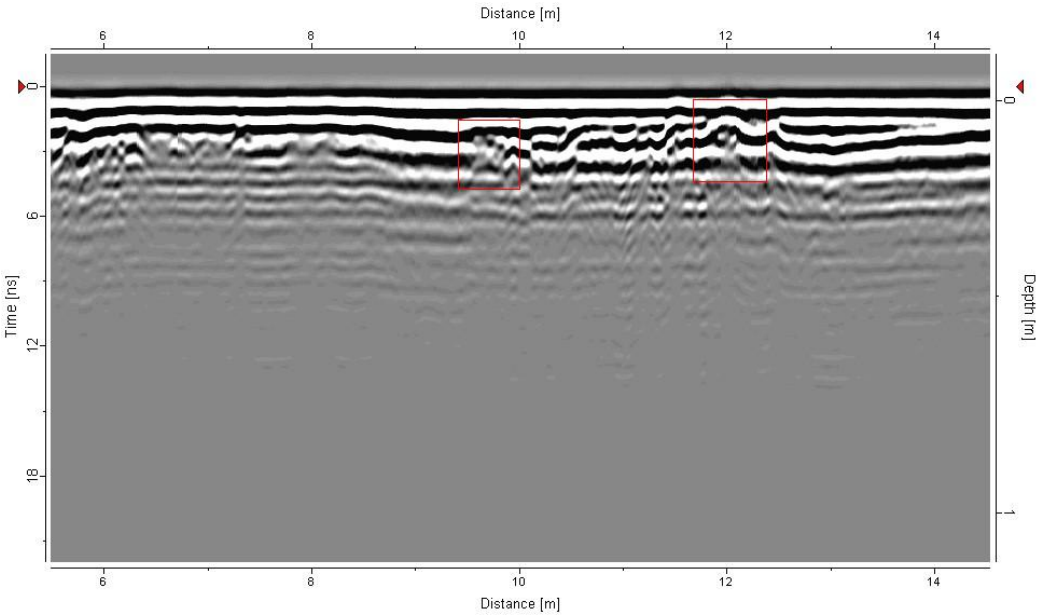


圖 31 淺層存在樹根

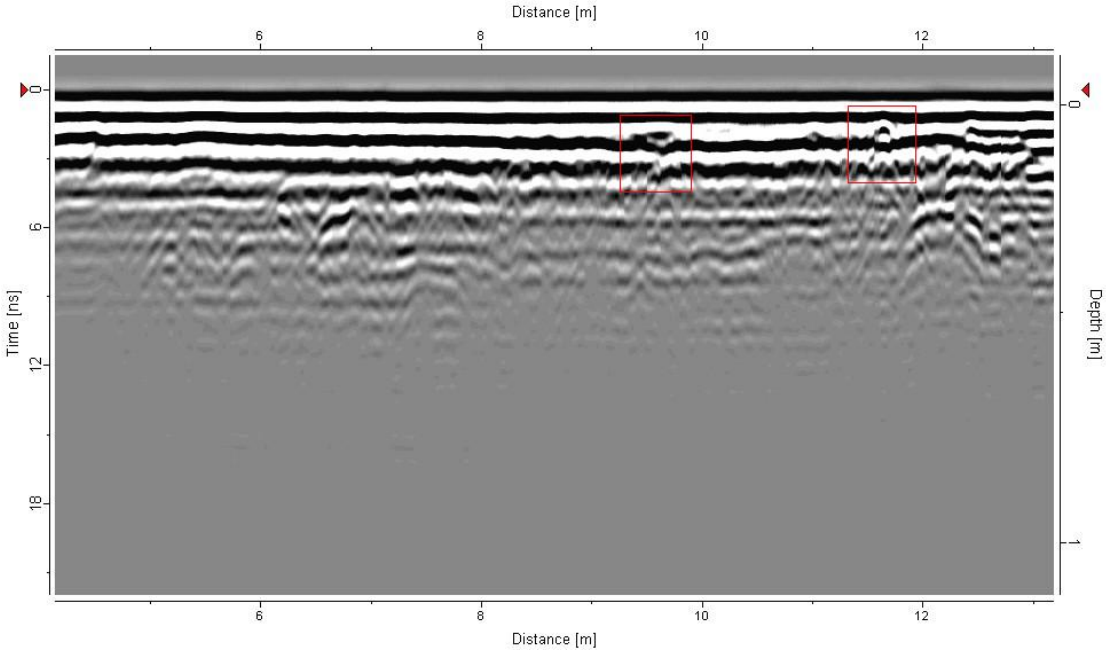


圖 32 淺層不存在樹根

開挖驗證將右側瀝青混凝土舖面挖開後，發現確有二層瀝青混凝土存在；當初推測淺層有物體之區域，多發現在兩層瀝青混凝土中夾有細的樹根；而在探測結果例一中，距離起點 9.5m 與 11m 的強烈雷達回波，在現場發現有相對應的樹根存在，樹根直徑約 7cm。

圖 33 路徑 11m 距離根分佈狀況

透地雷達以往運用在土木環保領域，針對地面下的管線、鋼筋、空洞、裂縫、埋入物與地體構造等進行探測，國內林業界首次引入透地雷達嘗試探測喬木根系分佈的探測，目前獲致的結果，對於直徑較大之樹根位置探測，已經可以從雷達回波與實際開挖結果中，找出有意義的相關性，可以事先探知植物附近鋪面下的狀況，以及預判根系位置與分佈，換句話說，透地雷達在植物根系探測的工作上，確實具有正面的助益。但是地面下方結構複雜，人為加諸的鋪面種類各異，植物種類繁多根系形式或有不同，勢必增加探測與判讀上的難度，需要更多次的嘗試，訂定標準作業模式，建立相關資料庫，方能使透地雷達設備與技術真正可以在植物根系探測的工作上發揮最大的效用。

五、參考文獻:

1.黃彥三，陳欣欣，漆陞忠（1993）非破壞性試驗技術應用於原木材質評估之可行性研究，林業試驗所研究報告季刊 8（1）：85-98。

2.柯志裕(1995)栽植距離對柳杉實大樑靜曲及動彈性係數的影響，台灣大學森林學研究所碩士論文:P.65。

3.黃彥三，陳欣欣，張金成，何逸民（1997）超音波應用於木麻黃立木樹幹心腐之探測，中華林學季刊 30（4）：445-450。

4.莊世滋、王松永(1997)應力波時間差法應用於材質評估之研究(1)，林產工業 16(4):681-696。

5.詹明勳(1999)台灣中部塔塔加地區台灣雲杉樹木年輪氣候學之研究，國立台灣大學森林學研究所博士論文:P.122。

6.詹明勳、陳勁豪、楊德新、王松永、曾郁珊、洪崇彬 (2005) 超音波技術應用於造林木立木材質檢測之探討 中華林學季刊 38(4)。

7.詹明勳、王亞男、黃憶汝、林瑞進 (2005) 老樹巨木樹齡估測之研究 中華林學季刊 38(2):139-150。

8.詹明勳、曾郁珊、蔡明哲、高毓謙、李佳韋、郭佩鈺 (2005) 三種非破壞檢測技術應用與柳杉造林木立木材質之評估 台大實驗林研究報告 19(3):207-216。

9.王松永、林振榮 （2001）應用鑽孔抵抗技術評估台灣杉造林木之早晚材境界密度，台灣林業科學 16(3)：197-200。

10. 陳勁豪（2002）萌蘗林與實生林杉木材質之研究，台灣大學森林學研究所碩士論文。

11. 曾鬱珊 (2002) DmP 非破壞檢測系統應用於古蹟及歷史建築木構造損壞評估之基礎研究，國立台灣大學森林學研究所碩士論文:P.90。

12. 徐光平 (2003)不同栽植密度對台灣杉立木與木材性質之影響，國立台灣大學森林學研究所碩士論文:P.67。

13. 陳欣欣、黃彥三(2002)栽植距離與寄節對針葉樹造林木材質超音波破獲評估之影響，中華林學季刊 35(1):85-90。

14.陳欣欣、黃彥三(2004)以超音波監測木材內部空洞之基礎研究，台灣林業科學 19(2):165-171。

15.Gerhards, C.C.(1978) Effect of earlywood and latewood on stress –wave measurements parallel to the grain. Wood Science 11

（2）：69~72.
16.Gerhards,C.C.(1982) Longitudinal Stress Waves for Lumber Stress Graging：Factors affecting applications： state of the art. Forest Products Journal 32(2):20-25.
17.Bucur, V.（1995）Acoustics of Wood. CRC press, Inc. p.177-196.
18.Ross, J.(1999) Inspection of Timber Bridges Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools。United State Department of Agriculture Research paper FPL-GTR-114.
19.F.C.Beall (2002) Overview of the Use of Ultrasonic Technologies In Research on Wood Properties. Wood Science and Technology 36:197~212.
20.Bo Kasal (2003) Semi-destructive Method for In-situ Evaluation of Compressive Strength of Wood Structural Members. Forest Products Journal 53:55~58.
21.Claus Mattheck and Helge Breloer (1994) The body language of trees A handbook for failure analysis The stationery office (TSO) Research for amenity trees NO,4 p239.
22 藤井英二郎、宮越リカ 譯 (1998) 樹木メツセージから樹木の危険度診断。
23 堀大才、岩谷美苗、小川泰彦、小川芳彦 (2004) 木の醫者つ 日本樹木醫會，p19-21。