

非破壞性檢測法應用於古蹟及 歷史建築大木作損壞之研究

內政部建築研究所委託研究報告

非破壞性檢測法應用於古蹟及 歷史建築大木作損壞之研究

受委託者：國立台灣大學森林學系

研究主持人：蕭江碧

協同主持人：蔡明哲

研 究 員：王松永

研 究 助 理：楊德新、高毓謙

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十二年十月

摘 要

關鍵詞：古蹟及歷史建築、木構件損壞評估、
非破壞性方法

國內木結構古蹟及歷史建築約佔六成，大木作損壞之程度除了與木構造古蹟及歷史建築的使用壽命相關外，大木作損壞之評估更對其結構安全性造成很大的影響。本研究首先針對目前國內古蹟及歷史建築大木構件非破壞檢測方法之適用性進行文獻資料之蒐集與分析。其次以超音波檢測儀、應力波檢測儀、阻抗圖譜儀檢測國內古蹟及歷史建築大木構件之損壞程度，可供建立古蹟及歷史建築大木構件損壞分級之參考，以及日後木構件採不同修復措施之重要參考依據。另外，並以萬能強度試驗機進行新舊木料之彎曲試驗，除可究明新舊木料非破壞檢測與破壞檢測結果之關係外，尚可究明國內古蹟修復所採用新料與過去使用天然林材質之差異，供未來擇用新料之參考依據。

1. 國內古蹟及歷史建築木料之非破壞檢測方法有目視檢驗法、敲擊檢驗法、探針檢驗法、聽診器檢測法、射線照射檢測法、超音波檢測法、構件損壞評估法、阻抗圖波檢測法(Rinn Tech Resistograph 1410)、木材腐朽檢測法(Sibert Tech Wood Decay Analyzer)，各有其優點與缺點、以及適用性與侷限性。
2. 古蹟與歷史建築木料之損壞檢測，基本方法是目視與敲擊，定期的測定結果為認識異常之目的之超音波速診斷，更進一步集中重點之重要部位之監視法 Resistograph（或 DMP 檢測）會較為適當。Resistograph（或 DMP）進行檢查是局部

的損傷會隨之發生，但內部之狀態能加以把握之有效的方法。

3. 杉木新料的氣乾比重與 E_{DU} 之間的直線迴歸式有相關性，但與超音波速之間則無相關性存在。
4. 杉木新料超音波速與 E_{DU} 、 E_{DT} 、 MOE 相互間，所得直線迴歸式均具有顯著的相關性，而與 MOR 之間則無相關性存在。
5. 杉木新料 E_{DU} 、 E_{DT} 、 MOE 相互間，所得直線迴歸式均具有顯著的相關性。
6. 杉木 E_{DU} 、 E_{DT} 、與 MOR 相互間，所得直線迴歸式，亦有顯著性存在，但其相關係數僅有 0.60 左右。
7. 天然林杉木與人工林杉木之密度差異不大，但是影響其力學性質甚大之平均年輪寬，是以天然林杉木小於人工林杉木，而天然林杉木抗彎性質也遠優於人工林杉木。所以未來修復古蹟與歷史建築時，對於木料之挑選應非常慎重，並訂定一套正確之木料規範。
8. 本研究以超音波儀檢測台北孔廟抽換舊木料內部健全處之縱向音速值均在 4763 ~ 5671 m/s，符合健全材音速值之範圍。目視判斷試材僅周遭腐朽（近外側邊材），材料內部仍保有相當完整之斷面。結果顯示，國內古蹟修復抽換大多僅憑木料外觀目視之判斷，材料內部仍保有相當完整之斷面應仍能承受外力，或當作其他部材再利用，因此古蹟抽換木料之標準應即時建立，方不會因修復抽換木料而減損古蹟之歷史價值與浪費資材。
9. 評估試材品質時，可藉由音波之傳遞速度與其本身之密度來達成。
10. 超音波與 DMP 的檢測應用於古蹟材料之損壞上，有一定的可信度。

目 錄

第一章 緒 論

第一節 研究案之背景	01
第二節 研究目的與範圍	02
第三節 研究方法與進行步驟	03
第四節 預期完成之工作及具體成果	05

第二章 古蹟及歷史建築大木構件非破壞檢測方法

第一節 前言	06
第二節 國內外木料非破壞檢測方法	07
第三節 古蹟及歷史建築木料之非破壞檢測方法與程序	17
第四節 國內古蹟及歷史建築常使用木料性質之資料庫	29

第三章 古蹟及歷史建築修復用新木料材質評估

第一節 新木料	33
第二節 試驗方法	33
第三節 結果與討論	35

第四章 古蹟及歷史建築大木構件損壞評估

第一節 損壞舊木料	51
第二節 試驗方法	51
第三節 結果與討論	58

第五章 總結與建議

85

第六章 主要參考文獻

88

第七章 附件

第一節 期中審查意見與答覆	93
第二節 期末審查意見與答覆	93

表 目 錄

表 2-3.1：國內曾採用之非破壞檢測技術	18
表 2-3.1〔菌類子實體附著狀況之調查〕，〔敲擊〕，〔超音波速測定〕 三合一診斷木料損壞法	24
表 2-3.2 木橋木料損壞診斷結果	27
表 2-4.1 木構造歷史建築所使用木料的物理及力學性質	30
表 3-3.1 萌蘗林與實生林氣乾比重之 T 分配	35
表 3-3.2 萌蘗林杉木與實生林杉木超音波速之 T 分配	36
表 3-3.3 萌蘗林木材與實生林杉木超音波動彈性模數之 T 分配	37
表 3-3.4 萌蘗林與實生林杉木之橫向振動動彈性模數 (E_{DT}) 之 T 分配	38
表 3-3.5 萌蘗林與實生林杉木 MOR 之 T 分配	39
表 3-3.6 萌蘗林與實生林杉木 MOE 之 T 分配	39
表 3-3.7 目視分等與其他試驗的鄧肯分析表	40
表 3-4.1 杉木（福州杉）天然林與人工林木材材質之比較 ..	50
表 4-3.1 台北孔廟西庫與西廂全試材之縱向音波速度	58
表 4-3.2 台北孔廟西庫與西廂分段試材之縱向音波速度	58
表 4-3.3 台北孔廟西庫與西廂全試材與小試材間之差異性分析	59
表 4-3.4 台北孔廟西庫與西廂各分段試材進行音速值與抗彎性質 ..	60

圖 目 錄

圖 1-3.1 進行步驟流程圖.....	04
圖 2-3.1 調查對象之橋梁.....	22
圖 2-3.2 已顯著腐朽之地板（橋梁地板）	23
圖 2-3.3 橋梁地板下面附著之子實體.....	23
圖 2-3.4 橫切面間（縱向）之超音波速之出現頻率	25
圖 2-3.5 RESISTOGRAPH 之結果的例子	26
圖 3-3.1 萌蘖林杉木與實生林杉木超音波速之次數分佈頻率.....	36
圖 3-3.2 萌蘖林與實生林杉木超音波動彈性模數之次數分佈頻率圖	37
圖 3-3.3 杉木目視分等各等級的頻率百分率	40
圖 3-3.4 杉木比重與超音波速的關係.....	43
圖 3-3.5 杉木比重與 E_{DU} 的關係	44
圖 3-3.6 杉木超音波速與 E_{DU} 的關係	44
圖 3-3.7 杉木超音波速與 E_{DT} 的關係	45
圖 3-3.8 杉木超音波速與 MOE 的關係.....	46
圖 3-3.9 杉木超音波速與 MOR 的關係.....	46
圖 3-3.10 杉木 E_{DU} 與 E_{DT} 的關係.....	47
圖 3-3.11 杉木 E_{DU} 與 MOE 的關係	48
圖 3-3.12 杉木 E_{DU} 與 MOR 的關係	48
圖 3-3.13 杉木 E_{DT} 與 MOE 的關係	49
圖 3-3.14 杉木 E_{DT} 與 MOR 的關係	49
圖 4-2.1 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料的縱向音速示意	53
圖 4-2.2 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料的橫向音速示意	53
圖 4-2.3 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料分段試材的縱向音速示 意.....	53
圖 4-2.4 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉小試材縱向音速測定示意	53

圖 4-2.5 DMP (DIGITAL MICROPROBE) 儀器配件	55
圖 4-2.6 鑽孔阻抗力分佈圖	56
圖 4-3.1 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之音速值與 MOE 之關係圖	61
圖 4-3.2 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之音速值與 MOR 之關係圖	62
圖 4-3.3 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之密度值與 MOE 之關係圖	62
圖 4-3.4 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之密度值與 MOR 之關係圖	63
圖 4-3.5 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之動彈性模數與 MOE 之關係圖	63
圖 4-3.6 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之動彈性模數與 MOR 之關係圖	64
圖 4-3.7 西庫右間后 4 試材之橫向音速變化圖	65
圖 4-3.8 西庫右間后 5 試材之橫向音速變化圖	65
圖 4-3.9 西庫右間后 7 試材之橫向音速變化圖	65
圖 4-3.10 西庫右間前 3 試材之橫向音速變化圖	66
圖 4-3.11 西庫右間前 6 試材之橫向音速變化圖	66
圖 4-3.12 西庫右間前 8 試材之橫向音速變化圖	66
圖 4-3.13 西庫二-6 試材之橫向音速變化圖	67
圖 4-3.14 西庫左間前 8 試材之橫向音速變化圖	67
圖 4-3.15 西廂四-2 試材之橫向音速變化圖	67
圖 4-3.16 西廂四-3 試材之橫向音速變化圖	68
圖 4-3.17 西廂五后 3 試材之橫向音速變化圖	68
圖 4-3.18 西廂七前 4 試材之橫向音速變化圖	68
圖 4-3.19 台北孔廟西庫右間前 6 (距 A 端 90 cm) 木構件 DMP 檢測結果	72
圖 4-3.20 台北孔廟西廂五后 3 (距 A 端 300 cm) 木構件 DMP 檢測結果	

.....	73
圖 4-3.21 台北孔廟西廂四-3 (距 A 端 60 cm) 木構件 DMP 檢測結果	74
.....	74
圖 4-3.22 台北孔廟西庫右間前 8 (距 A 端 120 cm) 木構件 DMP 檢測結果.....	75
圖 4-3.23 台北孔廟西庫右間后 7 (距 A 端 90 cm) 木構件 DMP 檢測結果.....	76
圖 4-3.24 台北孔廟西廂四-3 (距 A 端 300 cm) 木構件 DMP 檢測結果	77
.....	77
圖 4-3.25 台北孔廟西庫右間前 3 (距 A 端 30 cm) 木構件 DMP 檢測結果.....	78
圖 4-3.26 台北孔廟西庫右間前 3 (距 A 端 270 cm) 木構件 DMP 檢測結果.....	79
圖 4-3.27 台北孔廟西庫二-6 (距 A 端 60 cm) 木構件 DMP 檢測結果	80
.....	80
圖 4-3.28 台北孔廟西庫右間后 4 (距 A 端 30 cm) 木構件 DMP 檢測結果.....	81
圖 4-3.29 台北孔廟西庫右間前 8 (距 A 端 60 cm) 木構件 DMP 檢測結果.....	82
圖 4-3.30 台北孔廟西庫左間前 8 (距 A 端 300 cm) 木構件	83

第一章 緒 論

第一節 研究案之背景

國內傳統建築中列為古蹟及歷史建築者約有六成以上屬於木構架為主的傳統建築，然傳統建築木構件可能受到不同因子之影響與危害，產生木構件之位移、變形、腐蝕或其他損壞。因而為達古蹟大木構件修復之目的，必須有對古蹟中木構件檢測之完善規畫。依民國七十三年公布之《文化資產保存法施行細則》四十六條之規定，古蹟修復應依下列原則為之：（1）保存原有色彩、形貌，（2）採用原用或相似之材料，（3）使用傳統之技術及方法，（4）非有必要不得解體。在此原則下，決定是否需半解體、解體修復、或根本無需解體重建時，對木構架之檢測顯得特別重要。

然目前之古蹟修復過程之調查檢測工作一項多偏重建築之人文及歷史研究，因而提出之修復對策相當粗略，對大木構件之損壞評估來說，一般均只記錄其損壞，而很少進一步探討其損壞原因及損壞後之強度。再者，在設計階段時，對於構件置換與否，亦只憑目視檢測及仰賴大木匠師之經驗判斷，無可依循之定量準則及缺乏科學之根據。這種過程，一方面造成鑑定方式或構件修復處理上有失客觀，而另一方面在安全、保守的觀念下，舊木構件被更換之比率也常偏高（古蹟修復案審查時經常被詬病），不僅造成資源浪費，更使許多古蹟在修復後完全翻新，無法將歷史證物作有效的保存。針對上述，若有木構件損壞檢測依循之定量準則，以及舊（堪用）木構件損壞之審慎評估研究，對於國內古蹟修復將有莫大之貢獻。

就木構件損壞檢測而言，由於對古蹟及歷史建築木作不得進行破壞檢視，因此應用非破壞性方法（Nondestructive Testing，簡稱 NDT）來檢測建築物中木構件內部損壞之程度、

位置、範圍，甚至用於修復時新木料之選購上，皆為唯一可行的方法。目前實際應用於國內古蹟之非破壞性檢測法對大木構件損壞程度的判斷有傳統的目視法、敲擊法、利用現代儀器的聽筒法、 γ 射線照設法、使用結構強度計算的損壞量測法以及超音波檢測法等。筆者曾使用非破壞檢測法-超音波法檢測木構件損壞，藉由超音波法可以求得木材之動彈性模數、剛性係數、音速、及對數衰減率，其中之彈性模數是木構材強度性質的重要指標。目前已獲致國內多處古蹟及歷史建築木作之基礎超音波資料庫，然而超音波檢測木構材腐蝕之技術雖經肯定，且在以往應用此類非破壞性檢測法所求得之動彈性模數、抗彎彈性模數和抗彎強度之間的關係的研究中，已有許多研究報告證實動彈性模數與抗彎試驗之抗彎彈性模數間，抗彎彈性模數及抗彎強度之間均有直線迴歸式關係存在，但實際應用超音波檢測木構材腐蝕之技術仍有侷限性與盲點，然而作為全面性的檢測標準仍有困難。

所以在考慮古蹟與歷史建築現場檢測木構件損壞的準確性、實用性、經濟性與安全性下，本研究除採用超音波法外，並配合應力波法，與採用鑽針阻抗（Resistograph）檢測系統（或 DmP 檢測儀），此系統是利用儀器配備的馬達驅動極細之鑽針鑽入木構件中，測得木構件對鑽針的阻抗強度，藉助此儀器與電腦連線，可瞭解木構件劣化的種類、程度、範圍與定位，可提供後續木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。

第二節 研究目的與範圍

本研究目的擬結合超音波法、應力波法與鑽針阻抗（Resistograph）檢測系統（或 DmP 檢測儀），進行國內古蹟及歷史建築舊木料之損壞檢測評估，並與國內所能購得之新料

材質進行比較。歸納研究目的如下：

- (1) 評估目前國內古蹟及歷史建築大木構件非破壞檢測方法之適用性。
- (2) 以超音波檢測儀、應力波檢測儀、阻抗圖譜儀檢測古蹟及歷史建築所使用舊木料之損壞程度及材質。
- (3) 探究舊木料抗彎性質之 MOE 及 MOR，與非破壞性試驗所求得動彈性模數 (E_d) 之關係，以究明不同試驗方法之間的相關性，供作為材質評估之依據。
- (4) 分析國內古蹟修復所採用新料與過去使用天然林材質之差異，供未來擇用新料之參考依據。

第三節 研究方法與進行步驟

3-1 研究方法

(1) 資料收集與分析

對於目前國內古蹟及歷史建築大木構件非破壞檢測方法之適用性進行文獻資料之蒐集與分析。

(2) 新、舊木料非破壞檢測

以超音波檢測儀、應力波檢測儀、阻抗圖譜儀檢測國內古蹟及歷史建築大木構件之損壞程度與材質。首先以 SYLVATEST 超音波儀與應力波試驗儀器檢測福州杉舊料與新料的性質，再以目視法與超音波法將福州杉舊料依其損壞程度分段後，以 SYLVATEST 超音波儀、應力波試驗儀器、阻抗圖譜儀 Resistograph 技術（或 DmP 檢測儀）檢測分段舊料徑向之損壞程度。

(3) 新、舊木料破壞檢測

將上述非破壞檢測後之舊木料分段，裁製成彎曲試驗試片、壓縮試驗試片、及剪斷試驗試片，以 SHIMADZU 1991 年出廠之加長型萬能強度試驗機進行破壞試驗。

3-2 進行步驟

進行步驟以流程圖 1-3.1 表示如下：

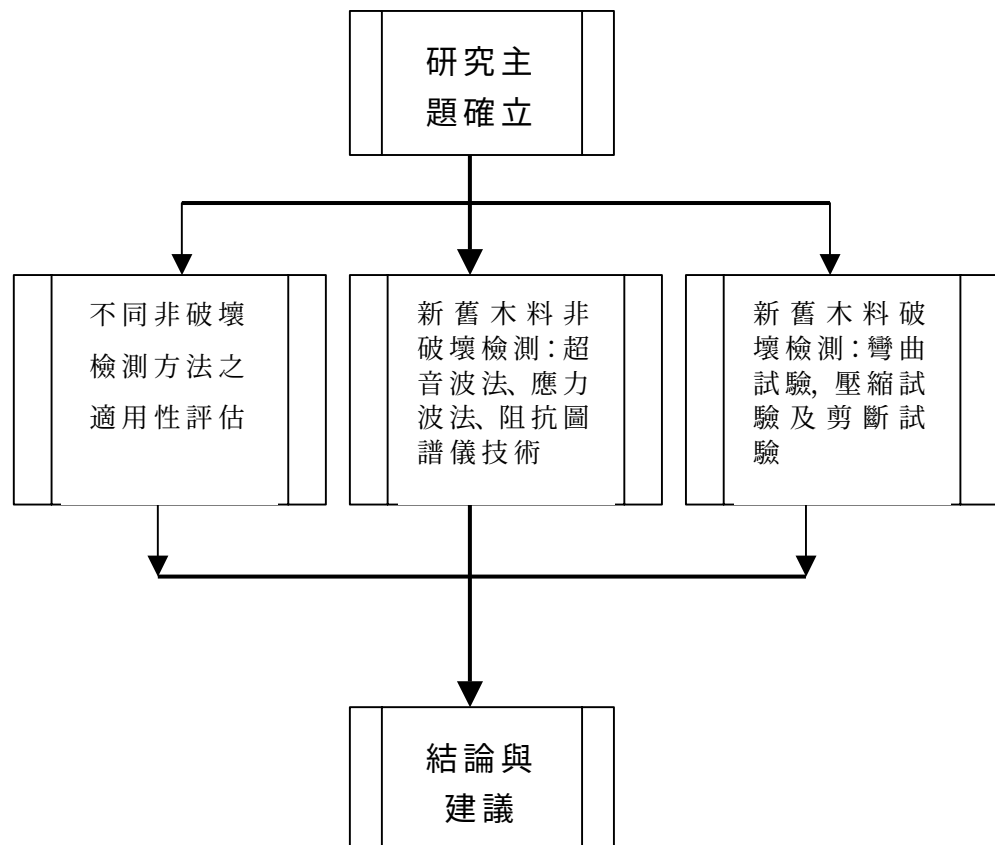


圖 1-3.1 進行步驟流程圖

第四節 預期完成之工作及具體成果

經由本計畫之執行，預期可完成如下之具體成果：

1. 探討不同非破壞檢測法評估古蹟及歷史建築大木構件損壞之可行性，可作為將來大木構件損壞調查之重要依據。
2. 以超音波檢測儀、應力波檢測儀、阻抗圖譜儀檢測國內古蹟及歷史建築大木構件之損壞程度與材質之成果，可供建立古蹟及歷史建築大木構件損壞分級之參考，以及日後木構件採不同修復措施之重要參考依據。
3. 可藉由古蹟及歷史建築大木構件舊料非破壞性試驗所求得動彈性模數 (E_D) 究明舊料抗彎性質之 MOE 及 MOR，供作為材質評估之依據。
4. 可究明國內古蹟修復所採用新料與過去使用天然林材質之差異，供未來擇用新料之參考依據。

第二章 古蹟及歷史建築大木構件非破壞檢測方法

第一節 前言

台灣傳統建築中列為古蹟者有 64%屬於木構架為主的傳統建築（沈學銘，1994：1），然傳統建築木構件可能受到不同因子之影響與危害，產生木構件之位移、變形、腐蝕或其他損壞。因而為達古蹟大木構件修護之目的，必須有對古蹟中木構件檢測之完善規畫。依民國七十三年公布之《文化資產保存法施行細則》四十六條之規定，古蹟修護應依下列原則為之：(1) 保存原有色彩、形貌，(2) 採用原用或相似之材料，(3) 使用傳統之技術及方法，(4) 非有必要不得解體。在此原則下，決定是否需半解體、解體修護、或根本無需解體重建時，對木構架之檢測顯得特別重要。

然目前之古蹟修護過程之調查檢測工作一項多偏重建築之人文及歷史研究，因而提出之修護對策相當粗略，對大木構件之損壞評估來說，一般均只記錄其損壞，而很少進一步探討其損壞原因及損壞後之強度。再者，在設計階段時，對於構件置換與否，亦只憑目視檢測及仰賴大木匠師之經驗判斷，無可依循之定量準則及缺乏科學之根據。這種過程，一方面造成鑑定方式或構件修護處理上有失客觀，而另一方面在安全、保守的觀念下，構件被更換之比率也常偏高，不僅造成資源浪費，更使許多古蹟在修護後完全翻新，無法將歷史證物作有效的保存。由於對古蹟構件不得進行破壞試驗，因此應用非破壞性檢測法（Nondestructive Testing，簡稱 NDT）來評估古蹟中木構件之損壞狀況，甚至用於新木料之選購上，皆為唯一可行的方法。

第二節 國內外木料非破壞檢測方法

2-2-1 國內外木料非破壞檢測之文獻回顧

所謂非破壞性檢測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(柯志裕, 1995; Ross and Pellerinet, 1991)。其相關說明簡述如下:在不損害材料『既定用途』的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(曾逸仁, 1997)。另外,侯國琛(1992)亦指出,『在不破壞材料,未來有效性之下,對材料檢測與檢查之所有測試方法的總稱』。黃義夫(1991):『運用各種不同之物理方法,對材料、零件或成品,在不破壞其組織,不影響其性能,不干擾其運用下,來檢探隱藏潛伏表面或內部的缺陷及其變移,量度在不同情況下之物性及其變化,測量各種之尺寸及其變動,最後將所獲得之資料加以研判鑑定,來決定其品質完整性及使用可靠性』。蔡錫堯(1996)『運用各種不同的物理方法或技術,用以檢測材料、零件或成品在加工過程或表面或底部之間斷(瑕疵、缺陷)以及量度其物理性質-測量、膜厚測量、導電率、彈性模數,而不破壞其原有組織、性能、品質及可用性,進而分析其間斷(瑕疵、缺陷)的尺寸、位置及變化情形,藉以作為品質可靠度鑑定之依據,此稱為非破壞性檢測(驗)』。

非破壞性檢測法應用於結構體安全性檢查、材料內部組織分析以至於古物、古董的鑑定早已行之有年,尤以放射性元素成功運用在工業研究與損壞預防方面,縮短研究所需時間並節省經費,成果卓著。這是一門應用廣泛的整合性科學,融合機械、物理、材料、化學、電子等學科,其功能時常被認為僅能檢查瑕疵並確定其位置,事實上非破壞性檢測法與技術還能量測工業物件與材料的物理特性、尺寸或不均質的情形,已成為現代工業實施品管的必要過程(侯國琛, 1992)。由於試驗觀念的不同,『非破壞性檢測』剛開始是 NDT(testing),偏重於適當方法的選用;接著是『非破壞性檢驗』NDI(inspection),檢查鑑定合格與

否，偏重於程序正當與否及應用；『非破壞性檢查』NDE (examination)，在什麼地方合格，什麼地方不合格，偏重於資料正確與否的研判；近年來更以『非破壞性評估』NDE (evaluation)，以積極的態度針對材料的各種特性加以評估，並檢討設計方法是否正確(曾逸仁，1997)。

Ross et al. (1991)對於 NDT 的定義為不破壞物質的評估方式，包含物理和機械性質，亦不影響其最終使用目的。藉由 NDT 技術提供準確的資訊，如性質、性能或材料的狀態等。傳統上，林產界使用 NDT 技術幾乎集中於結構材的分級與分等；其典型例子為 lumber 的機械應力分級 (Machine Stress Rating) 和單板的超音波分等。MSR 配合目視分等方式，正被廣泛的使用於北美地區(Galligan, 1977)。相同的，層積材工廠使用應力波 NDT 技術，對於單板加以分級，以便製造出不同強度的產品；其藉由應力波速度和強度間有密切相關性之原理，亦即基於應力波傳播於單板的速度(Sharp, 1985)。非破壞性試驗應用於木材時有別於其他均質、等方性材料(如金屬、塑膠及陶瓷等)；在於上述非木質材料的性質均勻，經製造過程的嚴謹管制，NDT 僅是用來檢測空隙、非連續性等缺點。但這種不規則的情形，在木材中卻是自然現象，所以 NDT 應用於木材時，係檢測這些天然和環境所導致的不規則現象，以決定其強度性質。

美國很早便從事木材非破壞性試驗的研究，Jayne(1959)在其研究報告中指出：我們可以使用一些非破壞性檢測方法來量測木材中能量貯存(storage)及散失(dissipation)的性質，這些性質和決定這些材料靜力性質是由同一機制所控制。所以這些性質和靜力性質之間的數學關係可以用統計迴歸分析加以達成。以微觀來看，能量的貯存受到細胞和結構排列組成的影響，而這些正是影響靜彈性及強度的因子，這個性質可以由振動的頻率或是音波傳播速度加以觀測；相反地，能量散失是由內部摩擦控制，通常觀察木材或其他材料的自由振動衰減率或音波衰減即可得知(柯志裕，1995)。

Galligan (1964) 指出木材或木質材料之 NDE 大致可分成下列四項：(1) 目視分等評估：顏色、缺點的存在，(2) 物理測試：電阻方式、

誘電率、振動特性、音波傳遞、音射及 X-ray 等方法。(3) 化學測試：組成分、防腐處理及耐燃劑處理之分析。(4) 機械性質測定：挺性、抗彎、拉伸及壓縮試驗、探針及鑽孔試驗。

角谷和男(1965)曾使用超音波音速技術測定，確認木材內部缺陷(空洞、腐朽或節)檢出的可能性，其中木材內部缺陷的存在會使超音波音速漸減，但節對於平行於木理方向的因素影響較小，而對徑向之因素影響較大。

Ross and Pellerin (1991)指出，以非破壞性試驗來檢測木材強度的方法有很多種，包括(1)施加小載重：此係在彈性限度內對試材施以靜載重，通常是以抗彎方式，由其載重與撓度關係計算彈性模數(田中俊成，1988;Sandoz，1993)。(2)振動法：此係使試材產生自由振動或強制振動，藉由其自然頻率或共振頻率來求出彈性模數(周群，1990;黃彥三等，1990;葉政翰，1994;田中俊成，1988;Wang and Chen,1992)。

(3) 超音波法：在木材的一端產生超音波，在另一端接收，由超音波傳遞時間(速度)來計算彈性模數(陳載永，1989;田中俊成，1988;Sandoz,1989)。(4) 應力波傳播：敲擊試材使其產生應力波，藉應力波傳播速度求出彈性模數(陳載永，1989;葉政翰，1994;田中俊成，1988;名波宜道;1992a; 1992b;1993)。(5) 打音法：在試材一端敲擊使其產生振動，在另一端面附近以麥克風接收木材中彈性波打擊音之傳播，利用 FFT 將瞬間發生之打音波形分解成頻譜，求出自然振動頻率，以便求出音速及彈性模數(黃彥三等，1990;葉政翰，1994;黃彥三等，1996)。以上(3)、(4)、(5)三種方法所利用的均是波速與介質有關的原理，雖然一開始的頻率不同，但是當音波從一個介質傳到另一介質時波長會改變，即可利用其波速求出材料的動彈性模數。

三城昭義(1994)探討包括(1)試材表面與 sensor 之接合方式，(2)試材長度，(3)木材的表面特性，(4)測定溫度，(5)使用頻率等因子，對木材中超音波傳遞速度的影響。Mishiro(1995;1996a, b, c, d)曾針對影響超音波傳播速度的因子，進行一系列研究。其中探討木材中的水分對於超音波速的影響概述如下：(1)木材中水分梯度的影響，當水分

梯度與音波傳遞的方向平行時，則超音波速符合複合材定律 $V=h_1/v_1+h_2/v_2+\dots+h_n/v_n$ ；(2)水分梯度與音波傳遞的方向垂直時，則波速主要依靠試材中最快的傳播路徑來決定。浦上弘幸等(1996)亦提出音波在木材軸(縱)向傳遞時，主要藉由秋材部分來移動，而木材中平均含水率的影響：(1)纖維飽和點(FSP)以內，脫濕過程中平均含水率曲線對超音波傳播速度，無論是徑向或是軸向，其形式是相似的。當考慮相對超音波速時，即每一樹種於MC%為0時，所測得之超音波速為100，則每一樹種可得一個方程式，此一方程式可以評估超音波速和平均含水率的關係。(2)纖維飽和點以上，脫濕過程中平均含水率曲線對超音波傳播速度，無論是徑向或是軸向，皆因樹種不同而有不同形式；同一樹種的徑向波速會顯示曲線變化，並不完全重現於縱向波速曲線。FSP以上時，木材飽水狀態脫濕時，徑向波速與平均含水率之曲線圖，可以複合材料定律的水分分佈來加以解釋。而密度對超音波速的影響則有：(1)縱向波速(V_L)不完全受比重影響。(2)徑向波速(V_R)會隨弦向波速(V_T)之增加而有增加的趨勢，縱向波速(V_L)與徑向波速(V_R)間則無顯著關係。(3) V_L 和 V_R/V_T 有隨比重的上升而有下降的趨勢，其意味著均質性提高，異方性降低。該研究亦指出，木理與年輪傾斜角對超音波速的影響為：(1)由縱向往徑向、弦向的超音波速會呈急遽的降低，在60°時較為緩和，此結果類似於抗彎試驗時木理角度對彈性模數或強度的影響。(2)在徑切面及弦切面中變動，針葉樹方面：由徑切面往弦切面移動時，在30°~50°時會呈現最小值；闊葉樹方面：由徑切面往弦切面移動時，呈急速下降的趨勢。

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(1981,1982)針對木材中音波特性的進行一系列的試驗，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。

鈴木弘志(1990)利用超音波技術探討柳杉及杉木之試材尺寸和木理傾斜角對於縱波傳遞速度的影響，指出(1)圓棒長度大於 50mm 時，其試材斷面與波長夠小的話，所測得之超音波音速接近於常數，且較以往由振動方法所測得之音速約大 20%。(2)當木理角度增加到 45°時，波速會急速的下降；由 45°往 90°增加時，波速會逐漸減慢。鈴木弘志(1998)則針對木材的三個方向的音速衰減率、頻率的變化、異方性及測定方法作了一連串的研究。

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；至於支持方式的影響，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持方式對試材應力波的時間差均無差異，所以可以確定支持方式對試驗不會產生影響；此外他們並指出敲擊力量的大小亦不會影響應力波的傳播速度，對於此點，葉政翰(1994)在其研究材種、含水率及長度對應力波試驗影響中，曾以預備試驗來証實此一說法。莊世茲等(1997)曾針對應力波非破壞性試驗中，對於產生應力波的鐵釘設置位置、釘入深度以及釘入角度對台灣杉旋切殘留圓柱材的動彈性模數 E_d 之影響與差異，得知釘子與試材表面不同夾角(30°、45°、60°)間並無顯著差異；此外釘子釘入深度(2cm、5cm)亦無顯著性差異，惟考慮方便性則以 2cm 較為合適。

名波直道等(1992a; 1992b; 1993)應用敲擊所產生之應力波傳遞速度，決定於柳杉原木中兩點間移動時之時間差，探討其測定上的各種問題以及應力波之傳播路徑確定。進而使用於立木個體及林分間的材質評估。

小玉泰義(1990)利用應力波速度進行柳杉與紅檜造林木機械強度之非破壞評估，基於經由 hammer 敲擊立木或原木所產生之音速，其與

彈性模數間有密切的關係，進而研究運用音速作為立木應力分等之可行性。小玉泰義(1992,1996)為了解木材中水分、密度對於超音波特性的影響。超音波音速會隨著含水率的增加而降低，在 FSP 以上時隨著含水率的增高，橫向音速與縱向音速的比值有增加的趨勢。當含水率在 FSP 以內時，音速會隨著含水率的增加而成直線狀的遞減，迴歸式為 $V=a(MC)+b$ ，而且比重愈增高時，迴歸係數 a 有遞減，常數 b 有漸增的趨勢。當含水率在 FSP 以上時，自由水的填充率 F 扮演著重要的角色， F 被定義為自由水體積與木材中空隙體積之比值，音速會隨著 F 值的增加，會呈現指數狀降低的情形，迴歸式為 $\ln c=a'F+b'$ ，所有試材的 a' 、 b' 值幾乎相同，當 F 值接近 90%時，所有試材皆會測得最小音速。

藤田晉輔等(1992;1994;1995)以打擊音法應用於柳杉製材品動彈性模數的評估作了一連串的研究，包括鐵鎚種類、支持條件、支持點距離(span)及打擊者性別、年齡對於動彈性模數(E_d)的影響。接著探討人為目視分等與彈性模數間的關係，節、人造缺點對於彈性模數的影響。進而探究原木與角材間彈性模數之關係，角材乾燥前後之動、靜彈性模數(E_d , MOE)的關係，原木動彈性模數與角材抗彎強度的關係。指出原木之 E_d 與鋸自該原木之角材的密度，具有相當高的相關性，可以作為推估的依據；角材 E_d 和 MOE 間亦有很高的相關。他亦提出作為 NDT 儀器的基本要求為：(1) 測定的普及化，(2) 儀器需價格低廉，(3) 操作簡便，(4) 動、靜彈性模數的一致性、再現性要高、信賴性要高。

中村昇(1993)利用定常波(V_f)、應力波(V_s)及超音波(V_u)法，測定柳杉在脫濕過程中之音波速度及彈性模數。所得結果如下：(1)三種音波速度皆隨含水率的增加而減少。在 FSP 以內， V_f 、 V_s 及 V_u 大致相等；在 FSP 以上時，則 V_s 及 V_u 相等，而 V_f 呈現不同值。彈性模數部分與波速相似，可以 FSP 為分界點，在 FSP 以內， E_{df} 、 E_{ds} ，及 E_{du} 大致相等；在 FSP 以上時，則 E_{ds} 及 E_{du} 相等，而 E_{df} 呈現不同值。(2)縱振動的頻率由於是全體木材(包含自由水)參與，故彈性模數的計算係加入包括自由水的外觀密度，則較為一致。而應力波、超音波則依靠實質部分(細胞壁)來傳遞，自由水對於波速係為間接影響，若加入外觀密度，彈性

模數則有提高的趨勢。(3)音波的傳播速度、振動特性，受到①音波的種類，②含水率，③材料的大小的影響。中村昇(1996)使用超音波法作為評估東京大學北海道實驗林冷杉及落羽松立木之材質，所得結果如次：(1)愈多年生之冷杉立木，所測得之外觀動彈性模數(E_u)會愈大。(2)外觀動彈性模數(E_u)會隨著成長指標-胸高直徑(DBH)、樹高(TH)增大而有增加的趨勢；但 30 年生者呈相反的趨勢。(3)將超音波速的平方(V^2)與外觀彈性模數進行迴歸分析時，可得一直線迴歸方程式且通過原點，由此可藉以推定外觀密度。(4)由冷杉及落羽松測得之超音波波速(V_u)會大於以往測得之柳杉應力波波速(V_s)；相同的由冷杉及落羽松測得之超音波動彈性模數(E_u)亦會大於柳杉應力波動彈性模數(E_s)。(5)不同的動彈性模數可用於確定不同的生育地及不同齡級。Sasaki (1991)亦指出木材中應力波的傳播路徑是經由實質部份完成，但應力波的傳遞速度則是整體試材材質的表現。

祖父江信(1993)指出，由超音波速所計算而得之動彈性模數，在纖維飽和點以上時，會隨著含水率的增加而有漸增的趨勢，這種現象違背木材的物理特性，其原因係為 FSP 以上之自由水會增加其外觀密度，當作參數加入動彈性模數計算時會增加其值。細胞腔、細胞間隙中存在的自由水，當木材實質進行高速振動時，部分的自由水受到細胞壁的牽引，進行同位相運動，另一部分自由水由於慣性作用之故，無法追蹤木材實質振動，而成逆位相運動。其以柳杉試材經頻率為 220kHz 之超音波試驗，模擬計算出有 78%的自由水會與木材實質部分作同位相運動。南澤明子(1990)亦指出自由水之 k 值會隨著振動頻率的不同而不同，頻率愈高者， k 值有漸低的趨勢。

Ross et al. (1988)針對無缺點試材和木質複合材料的音波特性加以檢測，發現有良好的相關性。Ross et al. (1997)則針對 eastern spruce 及 balsam fir 原木及其鋸切成之角材進行應力波非破壞性檢測，其中(1)原木經目視分等之結果與角材 MOE 之關係並不顯著。(2)原木動彈性模數和角材所得之彈性模數平均值，具有良好的關係。(3)原木 MOE 和角材 MOE 個別值之間，雖有關係存在，但不明顯。

Schad et al.(1995)以應力波技術評估鋸自枕木之實大樑品質，得到枕木之 MOE 與實大樑之 MOE 間有正相關，並且隨著試材尺寸的愈來愈小，其預測的準確性會逐漸降低。這些資訊顯示出應力波速度可以作為木材內部腐壞情形的有力指標。

Sandoz(1989)以超音波測定 spruce 的材質，指出超音波在水中的傳遞速度比在木材中慢，木材含水率高時則超音波音速會變慢，經統計分析發現速度平方的倒數和抗彎彈性模數的倒數會有最好的關係出現。Sandoz(1993)提出三種非破壞性試驗的方式，並論及其優缺點比較；他論述第一種方式為機械方法為使用機械應力分級 (Hoyle,1965)，但此法僅限於具有標準橫斷面之試材以及無法使用於立木和現場結構材之評估，且此一技術相當複雜、昂貴。第二種方法為利用振動方式，求得其自然共振頻率以計算出彈性模數，此法可以應用於立木材質評估以及不規則斷面樑。第三種方法係採用超音波法，利用音波於木材中傳遞的原理測得動彈性模數，此法可廣泛使用於木材材質評估、林業的經營及都市林木健康情形的診斷等。

Mamad et al.(1984)曾針對約 20 年生柳杉造林木進行研究，其是針對被認為樹冠內重心點下方加以牽引，以探討其機械性質，他們指出在載重點之橫向變位或範圍會隨載重增加而直線狀增大。

陳載永(1996;1997)針對應力波於木材或木質材料中傳遞的各項影響因子，以及各項 NDT 適用性進行一連串的研究。得知(1)應力波音速和縱向振動頻率，皆會隨含水率的增加而降低；其影響程度在 FSP 以內時較明顯。(2)應力波音速不受試材長度影響。(3)木材之人造孔洞會使應力波音速降低。(4)節的存在亦會影響應力波速度。(5)應力波速度所求得之動彈性模數，較以振動頻率所測得之動彈性模數，更接近抗彎試驗之彈性模數。(6)木材經縱向接合後，應力波速度有增快的趨勢。(7)由 NDT 測得之動彈性模數與抗彎彈性模數(MOE)相關性較高，而與抗彎強度(MOR)則較差。

黃彥三等(1986;1990)亦曾針對超音波在木材與原木內進行傳播

時，其各種影響因子之進行探討，期能由其音速與動彈性模數之相關性作為非破壞性試驗之依據，惟對於立木狀態尚未述及。黃等 (1996)得知木材中之自由水分在打音時完全表現在生材之密度變化上，以打音法所求得之音速，完全遵守音速與材質關係之基本物理定律，故在含水率高於纖維飽和點之生材狀態，利用音速變化來推定木材重量變化或含水率變化是合理可行的。1997 利用超音波技術，進行金門地區木麻黃立木樹幹內部之生物品質評估，指出圓盤中 90°與 180°(徑向)之穿透時間比會隨著孔徑的增加而降低，此一結果可作為樹幹心腐程度之評估依據。

浦上弘幸等(1996)指出利用超音波技術作木材非破壞性檢測時，對於具有不同密度及彈性模數之春秋材所構成的層狀構造之影響，有必要作釐清。得知，直列(series)模式試材(相當於徑向)之彈性波傳遞時間，為各要素獨立(相當於春秋材)傳遞時間的總和；而並列模式試材(相當於縱向或弦向)，乃是依賴傳遞速度較快之要素而決定。綜合而言，以音速來評估木材之彈性模數時，以徑向所得的音速較值得考慮。

Rajeswar et al.(1997)以超音波 NDT 技術，利用其對於木理角度和節的敏感性，進行木材的應力分級，將 NDT 所測的結果，藉由統計模式來預測木材的拉伸強度。接著把超音波方法及其他 NDT 技術做比較，包括抗彎彈性模數(MOE)、敲擊應力波之 MOEd 以及橫振動之 MOEd。

Kabir et al.(1997)利用超音波技術檢測木材組織構造三個方向及木理角度之音速和彈性模數，由縱向測得最高之音速與彈性模數，音速和木理角度間亦可得到線性迴歸方程式；音速及彈性模數亦會隨著含水率的增加而降低。Bucur(1995)指出由木理平行方向所測得之超音波音速會明顯大於徑向及弦向者，其原因係為縱向細胞沿著軸向排列，提供一個連續的路徑；纖維長度和縱向音速間有一密切的相關性。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 約=3:2:1，因此木材之異方性可以利用三方向之超音波音速的比

值加以評估，而且結果合乎木材機械性質(如彈性模數)。

白川貴志等(1998)使用超音波顯微鏡測定細胞壁中音波的傳遞速度，其中徑面板纖維軸管胞壁音速之迴轉角度，以 0° 時最大，遞減至 80° 時最低。晚材細胞壁中的音速(5000-6000m/s)明顯大於春材細胞壁者(4000-5000m/s)。Sun et al.(1998)研究超音波在木質複合板類之板厚度方向的傳播機構，發現板厚度方向的超音波；音速會隨著密度的增加而增加，而且內聚強度與厚度方向音速呈指數狀的關係。釜口明子及小玉泰義等(1998)使用橫打擊振動法推定立木之含水率，與樹幹內空洞的檢測。

第三節 古蹟及歷史建築木料之非破壞檢測方法與程序

2-3-1 國內曾採用之非破壞檢測技術

由於對古蹟構件不得進行破壞試驗，因此應用非破壞性方法（Nondestructive Testing，簡稱 NDT）來檢測古蹟中木構件內部損壞之位置與程度，甚至用於新木料之選購上，皆為唯一可行的方法。另外，如何將非破壞檢測之結果應用在維修補強時的依據，同時在維修補強時能兼顧《文化資產保存法施行細則》規定的四個原則，將對國內古蹟與歷史建築震災後的保存成敗扮演決定性的角色，也考驗國內古蹟修復業界。

古蹟修復過程簡單分為四階段，即研究調查階段、設計階段、施工階段與使用階段，國內過去在研究調查階段的檢測偏重建築人文、歷史研究，少進一步探討損壞原因、部位與程度，木構件損壞後之維修補強，不依損壞程度有不同策略、工法，而在設計階段，構件置換與否，只憑目視檢測或仰賴大木匠師經驗，無定量準則、缺乏科學根據，造成鑑定方式或構件維修補強處理有失客觀，缺乏專業性研判或補強處理錯誤，造成災害來臨嚴重損毀，九二一大地震造成古蹟建築構件間脫開、構件崩落後損壞，威脅結構安全，造成後續修復困擾，是最好明証；同時在安全、保守觀念下，構件被更換比率偏高，不僅資源浪費，更使古蹟修復後完全翻新，無法將歷史證物有效保存。以下將近年來非破壞檢測法應用於古蹟建築物木構件檢測所用方法的特性、優點與缺點整理如表 2-3.1。

表 2-3.1：國內曾採用之非破壞檢測技術

非破壞 檢測技 術	特 性	優 點	缺 點
1. 目 視 檢驗法	(1) 不須特別的設備或儀器，具經濟性 (2) 觀察或檢測的過程安全 (3) 目視觀察以經驗及知識為背景加以判斷，並以文字敘述說明材質狀況	(1) 簡單便利可行 (2) 敘述值的基本資料可與其它檢測法相輔相成	(1) 僅能觀測材料外觀，無法判斷內部材質 (2) 古蹟木構件隱蔽部份無法觀測 (3) 缺乏科學實證證明，僅就現象以經驗及常識判斷結果，主觀性強 (4) 單一描述性觀察過程，無法完整呈現材料材質變化狀態
2. 敲 擊 檢驗法	(1) 僅需使用敲擊工具 (2) 對木構件及人員具安全性 (3) 依音響特性及以經驗及知識為背景加以判斷，簡便可行，並以文字敘述說明評估	(1) 敲擊法簡便可行 (2) 敘述值的基本資料可助於其它檢測法檢測判斷	(1) 無法全面實施，木構件隱蔽部份無法實測 (2) 內部損壞種類及程度無法判斷 (3) 缺乏量化數值證明，僅以經驗及常識判斷結果，過於主觀 (4) 單一描述性檢測，無法完整呈現材質狀態，需配合其它方法
3. 探 針 檢驗法	(1) 僅需使用探針為工具 (2) 對木構件及人員具安全性 (3) 以探針檢測與經驗及知識為背景加以判斷，簡便可行，並以文字敘述說明評估	(1) 工具為探針，簡便可行 (2) 可測量損壞深度及瞭解材質危害狀況	(1) 僅可適用於具外部(表面)損傷缺點探測，內部損壞程度受限 (2) 探針亦有破壞木構件之可能性 (3) 探針探測的深度，缺乏精確量化資訊 (4) 探針法判斷木構件損壞

			程度，依賴經驗及常識判斷，過於主觀 (5) 須配合其它方法，方可完整評估材質
4. 聽診器檢測法	(1)僅需使用聽診器為檢測工具 (2)對木構件及人員具安全性 (3)依生物活動聲響性與以經驗及知識為背景加以判斷，簡便可行，並以文字敘述說明評估	(1) 聽診器檢測法簡便可行 (2) 可確認蟲蟻等生物性的活動	(1) 僅限於生物性危害探測，必須配合其它方法檢測材質狀況 (2) 僅限於生物性活動期間 (3) 易受環境中其它雜音干擾 (4) 聽診器法依據聲響判斷木構件損壞程度或種類，多依賴經驗及常識判斷結果，過於主觀
5. 射線照射檢測法	(1)設備費高、判讀時間長、專業性高 (2)r 射線法對人體有危害性，操作需注意安全性 (3)比其它射線法所需主要儀器及附件體積及重量尚屬便利 (4)判讀及操作之專業性高 (5)經分析確認可獲得木構件內部實際狀況，惟對天然瑕疵、生物性破壞等缺點仍缺乏完整解析能力 (6)處理時間長、成本高、部份木構件銜接處無法處理。	(1)儀器適合現場檢測木構件 (2)可有效檢測出木構件實際內部材質狀況 (3)依據檢測詳細資料建立基本資料庫	(1)設備費較高、判讀時間長、專業性高 (2)r 射線法對人體或木構件有影響，操作需注意安全性 (3)判讀及操作之專業性高 (4)經分析確認可獲得木構件內部實際狀況，惟對天然瑕疵、生物性破壞等缺點仍缺乏完整解析能力 (5)處理時間長、成本較高、部份木構件厚度、銜接處或部份構件無法檢測。
	(1)超音波主機體積小、	(1)體積小、重量	(1)無法判斷缺點種類及大

6. 超 音 波 檢 測 法	重量輕及便利可行，惟不易檢測較高地方 (2)超音波對人員及試材具安全性 (3)操作及判讀容易 (4)缺點嚴重時無法傳遞能量，無法檢測數值 (5)部份木構件隱閉處無法檢測，如木構件交接處 (6)無法判斷缺點的種類，僅可獲得整體材質狀況	輕、便利可行、操作及判讀容易 (2)對人員及試材無害 (3)可檢測木構件的整體材質狀況，評估材質降等情形，並建立基本資料庫	小 (2)受木構件基本材質之影響如比重、含水率之影響 (3)部份不能施放探頭處無法檢測 (4)缺點嚴重時無法測定或可能受外加物之干擾檢測 (5)需配合其它檢測法進行評估，提高評估材質的準確性
7. 構 件 損 壞 評 估 法	(1)所需器材僅需探針、榔頭及小鐵尺等物，攜帶方便，評估方式簡易，操作迅速 (2)對材料及人員安全 (3)僅可實施於表面損壞，可資量測部份，未能全面包含所有狀況 (4)無法判斷損壞原因，程度的評估僅限於剩餘載重，與實際值的差異不得而知	(1)簡便、經濟、安全 (2)可獲得定量評估值作為參考	(1)損壞分類過於主觀 (2)損壞量評估較粗放，內部損壞無法評估，損壞原因無法判斷 (3)剩餘載重評估與實際承載值的差異無法確定 (4)需配合其它方法檢測加以評估，且有破壞構件之慮
8. 阻 抗 圖 波 檢 測 法 (Rinn Tech Resistog raph)	(1)儀器體積與重量適中，外觀全長 84cm，鑽孔深度 400mm (無深度指示)，鑽孔直徑 3mm，解析度 0.04mm (2)電腦即時連線記錄與外接印表機	(1)鑽針損耗少 (2)操作便利 (3)操作誤差來源少 (4)儀器體積與重量適中 (5)儀器對人員及	(1)作業時間稍長 (2)鑽孔有直徑 3mm 之微破壞

1410)	(3) 儀器外觀為 PVC 管烤漆 (4) 驅動方式為伺服馬達，滾珠導螺桿驅動 (5) 價格約 60 萬元	- 試材具安全性 (6) 可簡易判讀，亦可連接電腦進行科學性研究 (7) 有經驗者可判斷缺點的種類、程度、位置與範圍 (8) 可適合檢測針闊葉樹材 (9) 可檢測木構件的斷面密度	
9. 木材腐朽檢測法 (Sibert Tech Wood Decay Analyzer)	(1) 儀器體積與重量較小，外觀全長 70cm，鑽孔深度 380mm (有深度指示)，鑽孔直徑 2mm，解析度 0.1mm (2) 電腦即時連線記錄與外接印表機 (3) 儀器外觀為槍型 (4) 驅動方式為伺服馬達與手推前進 (5) 價格約 30 萬元	(1) 作業時間短 (2) 操作便利性佳 (3) 儀器體積與重量小 (4) 儀器對人員及試材具安全性 (5) 可簡易判讀，亦可連接電腦進行科學性研究 (6) 有經驗者可判斷缺點的種類、程度、位置與範圍 (7) 適合檢測針葉樹材 (8) 可檢測木構件的斷面密度	(1) 鑽針損耗較多 (2) 人為操作誤差來源較可能，熟練之操作人員可(宜)避免 (3) 鑽孔有直徑 2mm 之微破壞

2-3-2 木料之非破壞檢測程序(以案例說明)

有關古蹟與歷史建築木料之檢測方法繁多，各有其適用處。以下舉日本檢測於 1990 年架設之木橋為例，加以說明。

此橋橋長約 56m 之吊地板形式之步道橋（圖 2-3.1），Bongossi (*Lophira alata*)，或稱 Azobe 材是當作木橋地板材。以下針對其健全度進行非破壞性診斷與評估。



圖 2-3.1 調查對象之橋梁

Bongossi 材斷面為 15cm×15cm，長 3m 當作地板材。診斷有（1）目視方法，此作為外觀診斷，觀察其割裂或變色狀況，將其程度數值化進行評估。同時觀察腐朽菌子實體之附著情形。（2）敲擊，為很方便，因此作為基本之診斷法廣泛的被採用，但一般其診斷精度較低，但此 Bongossi 材因硬度很大，只要內部有腐朽時打音即會明瞭內部的變化。敲擊是從上面（路面）六處與橫切面利用鐵鎚敲擊，對各位置區分成四階段，即 0（無異常），1（稍許感覺到），2（相當的感覺到），3（明顯的異常）進行判定。（3）超音波速則是就各板材在兩橫切面間之超音波速（sylvatest），共 223 支板材中除 31 支無法測定除外。大概可看出超音波速較理論值大幅度降低者，大概可確認附有腐朽菌子實體。此意味著超音波診斷是一種有效的腐朽診斷方法。針對一部分地板材無法測定其兩橫切面（即縱向）超音波速。為探究其原因，因此就其中 39 支板材進行斷面（即橫向）之超音波速測定。發現橫切面間（縱向）與斷

面間（橫向）之超音波速具有相關，在橫切面間超音波速無法測定時，可能腐朽之懷疑會較深（圖 2-3.2、圖 2-3.3）。

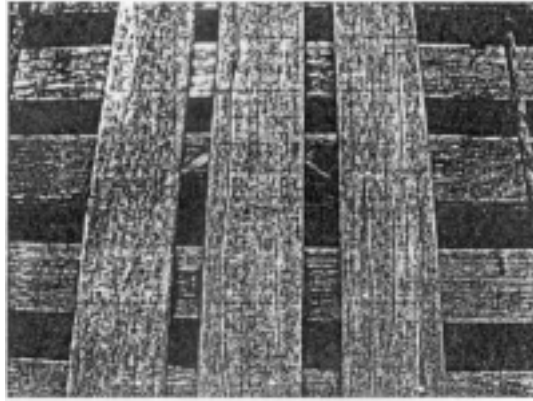


圖 2-3.2 已顯著腐朽之地板（橋梁地板）

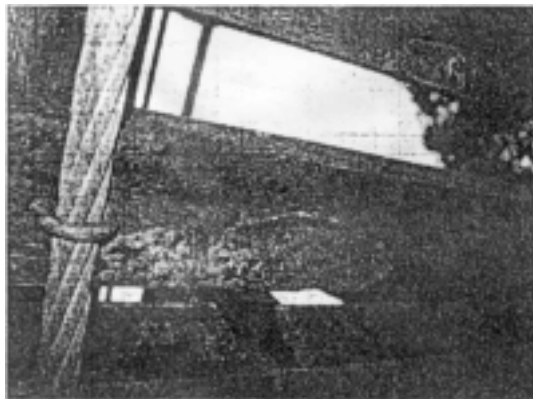


圖 2-3.3 橋梁地板下面附著之子實體

將上述三種非破壞性診斷進行歸納時，由其結果可知〔菌類子實體附著狀況之調查〕，〔敲擊〕，〔超音波速測定〕之三種方法作為診斷法是有效的。由表 2-3.1 可看出。

表 2-3.1 〔菌類子實體附著狀況之調查〕，〔敲擊〕，〔超音波速測定〕
三合一診斷木料損壞法

上面敲擊 level 超音波速	0	1 6	7	合計
3892 m/s	123 (6)	13 (1)	1 (0)	137 (7)
2724 3892 m/s	20 (3)	12 (4)	3 (2)	35 (10)
2724 m/s	0	4 (3)	16 (15)	20 (18)
合計	143 (9)	29 (8)	20 (17)	192 (35)

() 內數字為觀察子實體者的數目

敲擊是在上面診斷 level 7，即使任何一點，被認為在 level 2 以上者是假定為腐朽。另外縱面、橫切面間之超音波速之出現頻度如圖 2-3.4，當超音波速下降至理論值之 70% 者是假定為腐朽。如此，被判定為腐朽者是各為 20 支，其中 16 支是雙方均被判定為腐朽者。另外，其中 15 支是被確認有子實體的附著。從上述可確認此三種方法是有效的，而相互間有關連性。

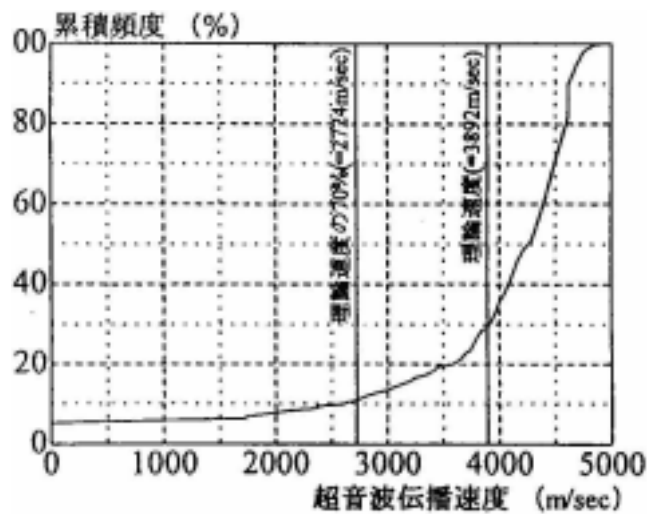


圖 2-3.4 橫切面間（縱向）之超音波速之出現頻率

2-3-2-1 含水率測定

含水率測定並非腐朽本身，而其作為是否為容易腐朽之環境，或是已經開始腐朽的指標。首先，使用高周波容量型（フソーFSK-118）在上面六處測定其含水率，於冬天之早上測定也許會受早晨露水的影響，因此得到 30 ~ 44%較高含水率。另方面，使用電阻式（kett ターク H）在上面 1 處測定結果為 12 ~ 22%較高周波容量型為低值。

另外，Bongossi 材內部腐朽會優先者，是內部含水率較高所致。在此，將電阻式與深部 sensor 相組合以測定構材中央部位之含水率，得知為 13 ~ 62%，分散甚大。尤其含水率約 60%之三構材均已腐朽。

2-3-2-2 Pyrodine、Resistograph，腐朽菌分離

Pyrodine 是從以一定力打入 pin 之貫入量，以推測木材之狀態之目的裝置。被認為不適合於從內部之腐朽之診斷，但測定結果是可數值化之優點。在此，使用打擊能量的 6J，pin 之直徑 2.5mm，最大打入深度 40mm，就各地板在 1 處進行測定。結果多數是在 10mm 左右，但一

部分會超過 30mm。

Resistograph 是以一定速度進行穿孔，同時測定其 torque 之裝置。鑽入任意深度與其鑽入轉矩（torque）的關係如圖 2-3.5 所示。

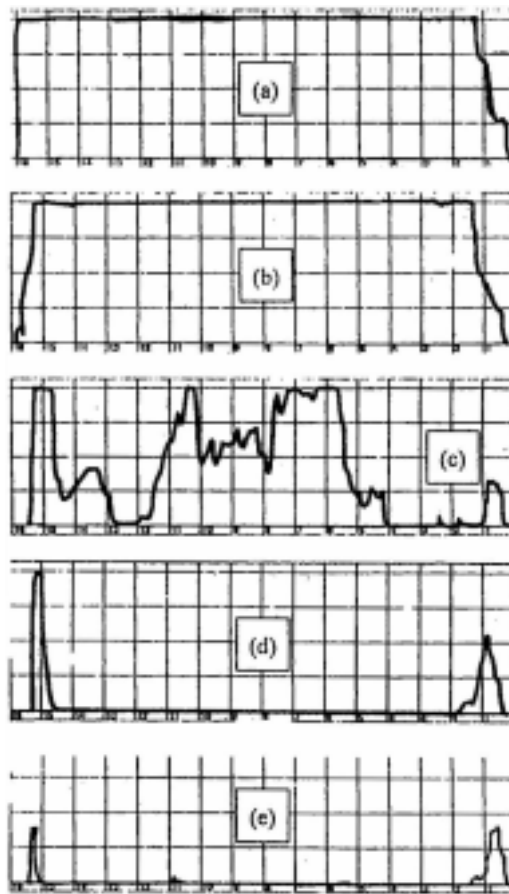


圖 2-3.5 Resistograph 之結果的例子

另外，地板穿孔所得到木屑進行木材腐朽菌之菌絲分離結果，以調查木材腐朽菌是否有侵入。其樣本是看不出子實體之發生，其他之診斷是從被懷疑異常之地板所採取。

2-3-2-3 對於內部診斷之探討

在此以具有特徵者 5 例，從表 2-3.2 與圖 2-3.5 之結果進行探討

首先 (a) 是全部之診斷均被認為健全者，從內部診斷結果亦可確認。另方面 (b) 是內部診斷被判定為健全，但從子實體與超音波速的結果被懷疑有腐朽。可能在 Pyrodine 或 Resistograph 之診斷位置是不太腐朽，有注意到局部性。(c) 是非破壞性檢查在超音波速是稍許較慢，其他看不到異常，但內部診斷可看出腐朽，腐朽亦被分離出來。從此事實，不管子實體之有無，腐朽是正進行之例子，另外，依腐朽狀況診斷會較難。

(d) 與 (e) 任何均依目視很明顯被判斷已腐朽之構材，(d) 之場合 Pyrodine 是表示健全值。此係打入側之健全部的厚度是不同，能加以說明。從此事例亦可知道 Pyrodine 是內部之腐朽是較難認識。

如上述，以非破壞診斷被推定為異常者，許多亦被確認同樣的異常，非破壞診斷之妥當性是可加以驗證。

表 2-3.2 木橋木料損壞診斷結果

構材	非破壞診斷				內部診斷			參考
	子實體	敲擊 level	超音波速 (橫切面間, 縱向)	預測	ピロデイン	內部 含水率	腐朽菌 分離	超音波速 (斷面間、橫向)
(a)	無	0	4688m/s	健全	12mm	未實施	未實施	1829 m/s
(b)	有	6	2143m/s	腐朽	7mm	未實施	未實施	1579 m/s
(c)	無	1	3093m/s	中間	40mm	36.0%	0	0
(d)	有	12	0	腐朽	11mm	18.7%	未實施	0
(e)	有	17	0	腐朽	40mm	56.1%	未實施	0

2-3-2-4 結論

Bongossi 材之腐朽診斷法，基本方法是敲擊，定期的測定結果為認識異常之目的之超音波速診斷，更進一步集中重點之重要部位之監視法 Rosistograph 會較為適當。Rosistograph 進行檢查是局部的損傷會隨之發生，但內部之狀態能加以把握之有效的方法。如穿孔轉矩（torque）與殘留強度之關係能明白時，對於耐力檢查亦可能，其會成為更有效的方法。

第四節 國內古蹟及歷史建築常使用木料性質之資料庫

2-4-1 前言

大木構架修復過程，新木料的替換往往爭議最多。依《文化資產保存法施行細則》四十六條所載之四項基本原則中，古蹟修復必須「採用原用或相似之材料」。所謂古蹟修復必須「採用原用或相似之材料」，其實就是挑選在組織構造、物理、化學與力學等性質上與原用相同或相似的木料。但由於規畫設計者以及施工現場，在用材之取捨判定之間常有極大的落差，一方面由於缺乏對木材之專業知識，另一方面由於近年來隨著全球森林保育之重視而改變的禁伐天然林林業政策，過去台灣傳統大木構架常用木料具有的木理通直（組織構造）、尺寸安定（物理性質）、優良天然耐候性（化學性質）與強度好（力學性質）之結構材特性，在可茲利用的人造林林木中並不多見。因此有關木構造歷史建築與古蹟常用木料之性質分析等資料庫之建立，不僅十分迫切，同時也能供往後修復時之依據，以及幫助政府推動歷史建築保存之工作，並提昇我國之國際形象。

2-4-2 常見木構造材料種類及基本性質

根據筆者在九二一災後至災區調查二百棟以上木構造歷史建築，又根據蔡明哲與徐明福（1998）在數個古蹟現場實地調查，以及洪國榮與蔡育林（1997）進行台灣傳統大木構架用材之調查結果，台灣扁柏（俗稱松梧，*Chamaecyparis obtusa*）、紅檜（俗稱台檜，*Chamaecyparis formosensis*）、台灣肖楠（*Calocedrus formosana*）、台灣杉（俗稱亞杉，*Taiwania cryptomerioids*）、鐵杉（*Tsuga chinensis*）、福州杉（俗稱杉木，*Cunninghamia lanceolata*）、柳杉（俗稱日杉，*Cryptomeria japonica*）、樟樹（俗稱本樟、芳樟，*Cinnamomum camphora*）、大葉楠（俗稱楠木，*Machilus kusanoi*）及台灣欒（俗稱紅雞油，*Zelkova formosana*）等為台灣傳統大木構架常用木料種類，這些構材種類皆有強度好、尺寸安定與木理通直之結構材特性，其中，台灣扁柏、紅檜、

台灣肖楠皆屬針一級木，與福州杉則是現今已指定的古蹟最常用之木料，除了調查所得材種外，過去在台灣的大木匠師尚使用其他也是非常適合營建木構造的材料，為免掛萬漏一，同時為提供政府災區重建之較完整資料，所以本研究廣泛收集國內常見木構造古蹟與歷史建築所使用材料種類及基本性質，以茲同時建立古蹟與歷史建築所使用木材之資料庫。同時由於台灣營林政策改變，未來災區木構造歷史建築修復能取得的木材，大多為永續經營林分取得之人工林木，與過去從天然林取得之材料性質不同，所以本研究購置或收集國內古蹟與歷史建築常見木構造材料，進行材料之重要性質，包括材料密度 (CNS451)、含水率 (CNS452)、收縮率 (CNS459)、吸濕性 (CNS6715)、壓縮強度 (CNS453)、抗彎強度 (CNS454)、剪斷強度 (CNS455)、引張強度 (CNS456) 之試驗與研究，以建立未來木構造歷史建築所使用之木材基本性質資料庫(表 2-4.1)，該資料庫之建立不僅可作為政府災區包括古蹟建築等傳統建築重建之重要參考，同時也可供採用相似或相近材料之依據。

表 2-4.1 木構造歷史建築所使用木料的物理及力學性質
「以 王松永 (1995) 為主」

樹種	容積密度 度數	絕乾 比重	含水率 (%)	平均收縮率%	
				徑向	弦向
台灣扁柏	0.491	0.547	12	0.105	0.224
紅檜	0.387	0.437	12	0.064	0.230
杉木	0.35	0.364	12	0.085	0.139
柳杉	0.302	0.336	12	0.069	0.156
牛樟	0.379	0.470	12	0.099	0.159
樟樹	0.395	0.420	12	0.074	0.118
台灣肖楠	0.444		12	0.135	0.166
台灣杉	0.332	0.371	12.0	0.105	0.178
鐵杉	0.517	0.594	12.0	0.185	0.280
大葉楠	0.479		12	0.062	0.107
台灣櫟	0.757	0.845	12	0.159	0.396

表 2-4.1 (續)：木構造歷史建築所使用木料的物理及力學性質
「以 王松永 (1995) 為主」

樹種	全收縮率 %			抗彎性質 kgf/cm ²	
	徑向	弦向	體積	MOR	MOE×10 ³
台灣扁柏	2.89	6.45	9.34	1039±88	123.3±1.58
紅檜	3.47	6.25	9.88	898±76	116.2±20.4
杉木	2.56	4.17	6.50	872±61	108.3±11.9
柳杉	2.07	4.69	7.27	896±83	132.2±21.9
牛樟	2.98	4.59	8.25	805±54	104.6±15.2
樟樹	2.21	3.54	6.13	1017±85	106.9±15
台灣肖楠	4.06	4.99	9.77	859±67	119.7±12.1
台灣杉	2.86	7.92	11.03	914±109	126.5±11.4
鐵杉	4.57	7.14	11.71	1221±114	149.3±33.2
大葉楠	1.85	3.20	5.09	652±36	104±5.2
台灣櫟	3.74	7.75	11.50	1555±132	144.2±15.0

表 2-4.1 (續)：木構造歷史建築所使用木料的物理及力學性質
「以 王松永 (1995) 為主」

樹種	縱向壓縮 強度 kgf/cm ²	橫向壓縮 強度 kgf/cm ²	縱向引張 強度 kgf/cm ²	橫向引張 強度 kgf/cm ²
台灣扁柏	452±86	86±16	630	53±12
紅檜	365±22	54±14	550	41±4
杉木	509±25	48±10	643±204	14±2
柳杉	218±38	58±11	461	27±4
牛樟	455±30	71±11	573±122	17±4
樟樹	575±47	96±20	590±116	22±4
台灣肖楠	551±22	121±22		56±8
台灣杉	387±66	64±20	568	32±7
鐵杉	511±46	63±11	500	44±8

大葉楠	295±32	48.3±8.3		48.8±6
台灣櫟	595±28	216±22	1058	81±12

表 2-4.1 (續)：木構造歷史建築所使用木料的物理及力學性質
「以 王松永 (1995) 為主」

樹種	剪斷強度 kgf/cm ²	硬度(橫切 面)kgf/mm ²	劈裂抵抗 kgf/cm ²
台灣扁柏	121±12	3.67	112±12
紅檜	102±19	2.39	90±9
杉木	115±23	2.68	28±3
柳杉	86±8	2.01	59±5
牛樟	142±16	2.66	39±7
樟樹	170±14	3.25	48±8
台灣肖楠	138±17	3.28	97±8
台灣杉	92±23	2.34	61±5
鐵杉	137±21	3.05	84±10
大葉楠	92±12	3.67	54.7±12.3
台灣櫟	191±18	5.69	108±13

第三章 古蹟及歷史建築修復用新木料材質評估

第一節 新木料

為了分析國內古蹟修復所採用新料與過去使用天然林材質之差異，供未來擇用新料之參考依據，本研究購置最常用材種福州杉（杉木，China fir，學名：*Cunninghamia lanceolata*）。木料來自於台大實驗林和社營林區第五林班，有砍自杉木實生林分與萌蘗林分，皆其為 20 年生之杉木。先設樣區進行每木調查，求出各立木胸徑及樹高，計算其平均胸高直徑，當作中勢木，每種造林地各選擇 15 棵中勢木當作樣木。

第二節 試驗方法

將樣區選出的 12 棵樣木伐採後，各製成 $5 \times 10 \times 200 \text{cm}^3$ 的實大梁試材，並測量其基本資料（長度、寬度、厚度、重量），並求得其生材密度。依 CNS13826 造林木針葉樹製材分等標準進行目視分等，將實大梁區分成一等材、二等材、三等材及其他。

接著使用超音波儀（Swiss Products，SYLVATEST，16KHz）測定其縱向超音波速 (V_L)，後利用 Metriguard Model 340 Transverse Vibration Tester 進行橫向撓曲振動試驗，求出其非衰減自然頻率 (f_n)，由次式求出其動彈性模數 E_{DT} 由次式求出：

$$E_{DT} = \frac{f_n^2 W L^3}{K b h^3}$$

選取材面上，目視之最大節，求出其最大長徑和材寬的比例，並依據 CNS13826 之標準，區分各實大梁的等級。

若在材面上還有弧邊、蟲蛀、縱裂等缺點，則計算出他們的比例，合併進行判斷。

將目視分等後的實大樑進行超音波測試。本研究使用瑞士製 SYLVATEST 超音波儀，該儀器係以兩個壓電性(piezo-electrical)換能器(transducer)，一個波動發振器(pulse generator)產生，另一個波動接受器(receiver)接受頻率為 16kHz 之超音波，由音波測定儀讀出所需時間(t)其單位為微秒(Microsecond, μs)精度為百萬分之一秒，測其於木材中之傳播速度，藉以評估木材材質，該儀器同時可測定木材溫度 0-50°C及含水率 0-156%。本研究求出木構件新料平行方向超音波速。

橫向撓曲振動法則是將實大梁放置於載台上，而後敲擊中央部位，使其撓曲振動並記錄其彈性模數數值。

在非破壞實驗後，進行破壞性試驗，乃將前述 5×10×200cm³ 實大梁進行四點載重（三等分載重）抗彎試驗，求出其比例限度載重與撓曲，再由載重與撓曲曲線圖求出抗彎彈性模數 (MOE)、抗彎強度 (MOR)。將做完每一階段超音波試驗的樣木進行破壞試驗，至絕乾狀態後，剩餘的樣木經調濕至含水率 12%。並依據 CNS454，將材料之兩端加以支持，在中央加上載重以進行抗彎試驗。

$$(1) \text{ 抗彎強度 (MOR)} = \frac{3P (l - l')}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$(2) \text{ 抗彎比例限 } \sigma_{bp} = \frac{3P_p (l - l')}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$(3) \text{ 抗彎彈性模數 (MOE)} = \frac{P_p (l - l') [3l^2 - 2(l - l')^2]}{8\delta_p bh^3} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

l' 為載重點間距離 (cm)

b 為長方形斷面之寬 (cm)

h 為高度 (cm)

δ_p 是為 P_p 載重時，在載重點之下〔跨距中央〕之撓曲 (cm)

l 為試片跨距 (cm)

第三節 結果與討論

3-3-1 實生林與萌蘗林杉木之探討

(一) 氣乾比重

經製材後所得到的試材尺寸為 $3.8 \times 9 \times 213.3 \text{ cm}^3$ ，而萌蘗林木材的氣乾比重平均為 0.380，實生林木材氣乾比重為 0.384，後者大於前者 1%，但經 T 檢定並無顯著性差異，同時其變異數相差不大，亦就是說，萌蘗林和實生林木材的比重是差不多的；比重和強度之間是有正相關的關係，比重越大強度應該會來得較大，比重小則反之，因此由比重的觀點來推測，未來進行破壞試驗時，其所得的強度萌蘗林與實生林應該是無明顯差異。

表 3-3.1 萌蘗林與實生林氣乾比重之 T 分配

	萌蘗林	實生林
平均數	0.380	0.384
變異數	0.00086	0.00153
觀察值個數	54	66
假設的均數差	0	
自由度	117	
t 統計	-0.6197	
P(T<=t) 雙尾	0.5366	
臨界值：雙尾	1.9804	

(二) 超音波速

超音波 (16kHz) 傳播木材之木理方向時，可得其萌蘗林杉木的超音波速 (V_u) 為 5156.7 m/s，實生林杉木為 5321.5 m/s，所以實生林杉木的超音波速比萌蘗林杉木的超音波速快 3%，經統計分析結果，兩者間有顯著性差異 (0.05level)。但是就變異數而言，實生林杉木的變異數比萌蘗林杉木來得大，因此可以推論實生林杉木的材質變異應該沒有萌蘗林杉木來得均勻。但是可從實生林杉木與萌蘗林杉木超音波速的關

係來推斷，實生林木材的材質可能比萌蘗林木材來得好一些，至於是否兩者之間的材質有實質上的差異，必須經過破壞性的檢測才可得知。

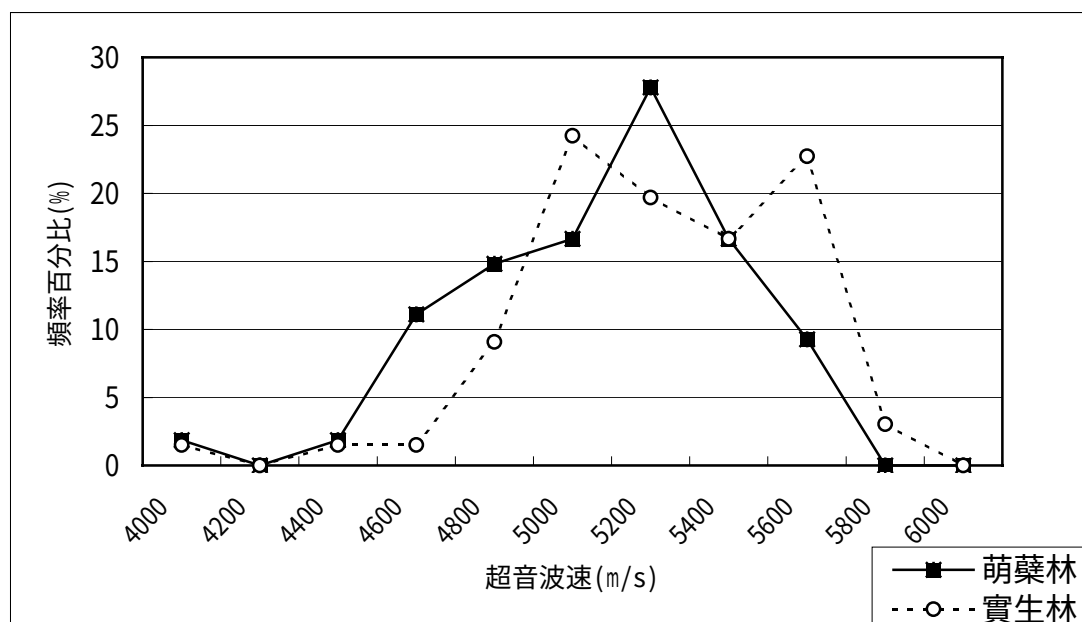


圖 3-3.1 萌蘗林杉木與實生林杉木超音波速之次數分佈頻率

表 3-3.2 萌蘗林杉木與實生林杉木超音波速之 T 分配

	萌蘗林	實生林
平均數	5157	5321
變異數	102597	114905
觀察值個數	54	66
假設的均數差	0	
自由度	116	
T 統計	-2.7292	
P(T<=t) 雙尾	0.0073	
臨界值：雙尾	1.9806	

(三) 超音波動彈性模數 (E_{DU})

萌蘗林杉木之超音波動彈性模數 (E_{DU}) 為 103300 kgf/cm²，實生林杉木超音波動彈性模數 (E_{DU}) 為 111460 kgf/cm²，實生林杉木的 E_{DU} 值會較萌蘗林杉木大 8%，但實生林木材之 E_{DU} 之變異數比萌蘗林杉木來得大，雖然萌蘗林杉木與實生林杉木間有顯著性的差異 (0.05level)，但亦不可忽略實生林杉木材質沒有像萌蘗林杉木來得均質。

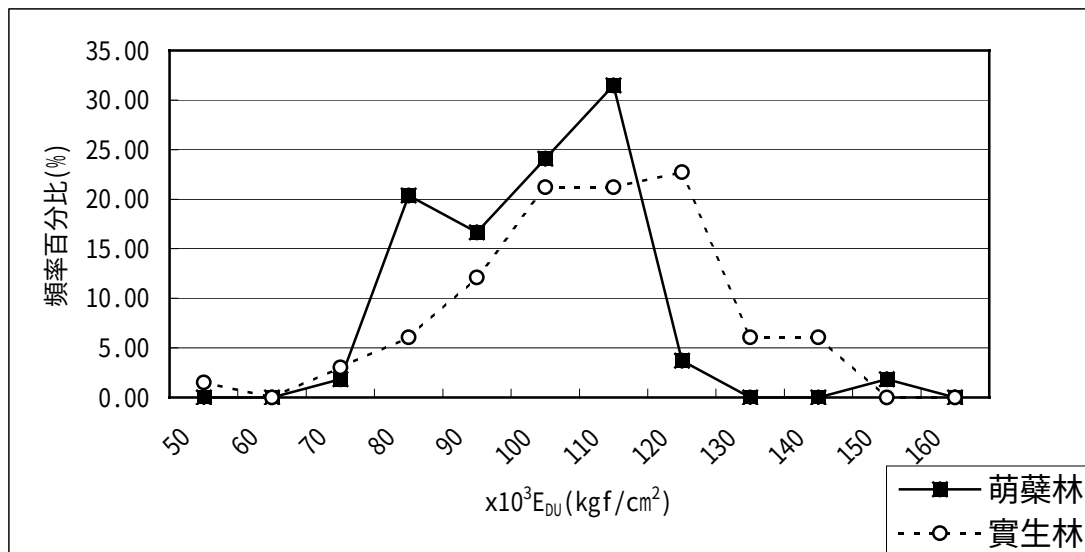


圖 3-3.2 萌蘗林與實生林杉木超音波動彈性模數之次數分佈頻率圖

表 3-3.3 萌蘗林木材與實生林杉木超音波動彈性模數之 T 分配

	萌蘗林	實生林
平均數	103300	111460
變異數	199322174	325439353
觀察值個數	54	66
假設的均數差	0	
自由度	118	
t 統計	-2.7801	
P(T<=t) 雙尾	0.0063	
臨界值：雙尾	1.9803	

(四) 橫向振動法彈性模數 (E_{DT})

萌蘗林杉木之橫向振動之 E_{DT} 約為 95510 kgf/cm²，實生林杉木之橫向振動 (E_{DT}) 約為 103740 kgf/cm²，實生林杉木之 E_{DT} 值會較萌蘗林杉木大 8%，經 T 值檢驗萌蘗林杉木與實生林杉木有顯著性差異 (0.05 level)，同時實生林杉木的變異數也大於萌蘗林杉木；而橫向振動和超音波均為非破壞性強度試驗方式，由 E_{DU} 與 E_{DT} 觀之，都是實生林杉木大於萌蘗林杉木 8%，且實生林杉木的變異也較大，因此可推論實生林杉木的 MOE 也會大於萌蘗林木材，實生林杉木之均質性可能沒有萌蘗林杉木來得理想。

表 3-3.4 萌蘗林與實生林杉木之橫向振動動彈性模數 (E_{DT}) 之 T 分配

	萌蘗林	實生林
平均數	95510	103740
變異數	163309833	328924797
觀察值個數	54	66
假設的均數差	0	
自由度	116	
t 統計	-2.9093	
P(T<=t) 雙尾	0.0043	
臨界值：雙尾	1.9806	

(五) 抗彎彈性模數 (MOE) 及抗彎強度 (MOR)

萌蘗林杉木的 MOR 為 406 kgf/cm²、MOE 約為 87030 kgf/cm²，實生林杉木的 MOR 為 439 kgf/cm²、MOE 約為 94030 kgf/cm²，無論是 MOR 或是 MOE 值，實生林杉木所得到的結果皆大於萌蘗林杉木的數值，各為 8.1%及 8.0%，但經 T 值測驗兩種木材之間其 MOR 沒有顯著性的差異 (0.05 level)，而 MOE 有顯著性的差異 (0.05 level)，其中 MOE 與之前橫向振動之動彈性模數所推測的結果是一致的，同時萌蘗林杉木的 MOR 值雖然小於實生林杉木的 MOR 值，但是因為沒有顯著性差異，也就是說兩者在強度上，可說是不分軒輊。

表 3-3.5 萌蘗林與實生林杉木 MOR 之 T 分配

	萌蘗林	實生林
平均數	406	439
變異數	10393	9179
觀察值個數	54	66
假設的均數差	0	
自由度	110	
t 統計	-1.8128	
P(T<=t) 雙尾	0.0726	
臨界值：雙尾	1.9818	

表 3-3.6 萌蘗林與實生林杉木 MOE 之 T 分配

	萌蘗林	實生林
平均數	87030	94030
變異數	277726533	375149991
觀察值個數	54	66
假設的均數差	0	
自由度	118	
t 統計	-2.1255	
P(T<=t) 雙尾	0.0356	
臨界值：雙尾	1.9803	

3-3-2 目視分等與其他試驗關係之探討

(一) 試材之目視分等各等級頻率

本研究將杉木實生林木材與萌蘗林木材原木製材，其尺寸如前述 3.8×9×213cm³ 實大梁，依 CNS13826 針葉樹造林木分等標準進行製材的等級區分，可看出其主要分等依據乃是節，其他缺點甚少，所得一等材佔 34.2%，二等材佔 12.5%，三等材佔 21.7%，其他佔 31.7%；而目視分等是否為科學的方式，需要用其他試驗的結果來證明，如果與其他試驗的結果有很大的相關性時，那麼目視分等將是很重要而且簡單的判

定方式。而本試驗，木材平均含水率為 15.5%。

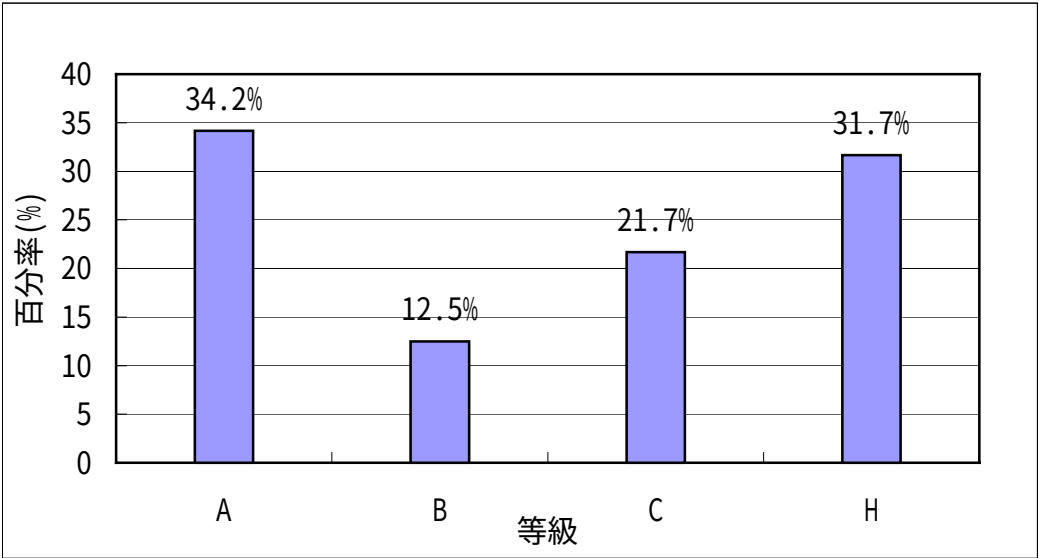


圖 3-3.3 杉木目視分等各等級的頻率百分率

表 3-3.7 目視分等與其他試驗的鄧肯分析表

Lumber grades	B (二等材)	H (其他)	C (三等材)	A (一等材)
Number of specimens	15	38	26	41
Average 比重	0.372	0.381	0.384	0.385
Significant difference 0.05 level				
Lumber grades	C	H	B	A
Number of specimens	26	38	15	41
Average 超音波速(m/s)	5174.2	5196.3	5262.9	5335.2
Significant difference 0.05 level				
Lumber grades	B	C	H	A
Number of specimens	15	26	38	41
Average $E_{DU}(x10^3 \text{kgf/cm}^2)$	105.3	105.5	105.7	112.2
Significant difference 0.05 level				

0.05 level				
Lumber grades	C	B	H	A
Number of specimens	26	15	38	41
Average $E_{DT}(\times 10^3 \text{kgf/cm}^2)$	96.4	98.4	98.5	104.4
Significant difference				
0.05 level				
Lumber grades	B	C	A	H
Number of specimens	15	15	68	22
Average MOR(kgf/cm ²)	395.2	425.9	427.4	435.2
Significant difference				
0.05 level				
Lumber grades	C	B	H	A
Number of specimens	26	15	38	41
Average MOE($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)	87.0	91.1	92.0	92.2
Significant difference				
0.05 level				

(二) 目視分等與比重的關係

由表 3-3.7 新多變域分析得知，目視分等和比重之間是沒有顯著的關係，主要是因為木材本身的密度相差就不大，同時目視分等亦不能看出其比重之大小，所以目視分等不適用於比重的推測。

(三) 目視分等與超音波速的關係

由表 3-3.7 亦可看出超音波速與目視分等間無顯著的相關性，其中一等材 (A) 的波速為最大，其次為二等材 (B)，再者為三等材 (C) 與等外材 (H)，因為三等材與等外材缺點其實相差無幾且多，所以兩者間不容易看出差異。

(四) 目視分等與超音波動彈性模數 (E_{DU}) 的關係

由表 3-3.7 亦可看出目視分等與 E_{DU} 沒有顯著的關係，雖然目視分等與超音波速有關係的存在，但是因為動彈性模數是由比重及超音波速的數值計算出來的，且比重與目視分等沒有顯著差異，所以目視分等與超音波動彈性模數沒有顯著關係的這個結果是合理的。而 Wang and Lin (1997) 報告提到，柳杉製材品依 JAS 標準分等時，其動彈性模數是以特等材為最高，依序為一等材料、二等材料、三等材料，此和本實驗不同，也許是由於本實驗之杉木只有 20 年生，幾乎均為未熟材，而造成不同目視分等之間 E_{DU} 值無顯著性差異。

(五) 目視分等與橫向振動之動彈性模數 (E_{DT}) 的關係

由表 3-3.7 亦可看出目視分等與橫向振動之 E_{DT} 亦沒有顯著的關係，因為橫向振動與超音波性質相類似，而 E_{DU} 與目視分等沒有顯著差異，所以目視分等與 E_{DT} 亦沒有顯著關係的這個結果是合理的。

(六) 目視分等與 MOE、MOR 的關係

由表 3-3.7 亦可看出 MOR 與目視分等沒有顯著差異；MOE 與目視分等亦沒有顯著差異。 E_{DU} 、 E_{DT} 及 MOE 值與目視分等都沒有關係，所以應該可以說，任何動彈性模數與目視分等都沒有顯著的差異性存在。而 Wang and Lin (1997) 對於柳杉製材品依 JAS 目視分等與 MOR、MOE 之關係探討，指出 MOR、MOE 均以特等材為最大，其次為一等材料、二等材料，三等材料為最差。此和本實驗不同，其可能亦是本實驗之杉木只有 20 年生，幾乎是未熟材，而未能顯示出品等與強度之關係。

目視分等只能看出木材表面上的缺點，木材本身有許多缺點並不會顯現在表面上，而有許多缺點存在於目視無法判定的地方，同時木材就算由同一棵樹所得製材品，但是其之間的差異性事實上也是蠻大的，因此由目視分等再配合以非破壞性強度試驗法對於判定木材之強度將較能達成目標。

3-3-3 杉木特性之探討

(一) 比重與超音波速的關係

氣乾比重和超音波速的相關係數非常的低，也就是說兩者之間無相關性，因此木材的超音波速是不會受氣乾比重的影響，由此可知，木材內部的傳音速度並不會受構成木材細胞種類及細胞壁成分多寡的影響，而是受到細胞排列方向的左右。

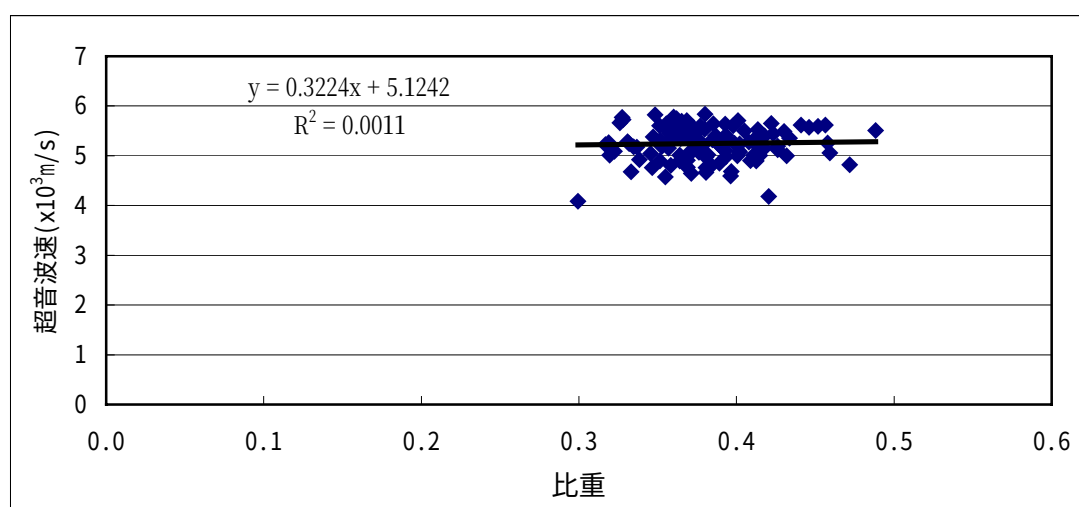


圖 3-3.4 杉木比重與超音波速的關係

(二) 比重與 E_{DU} 的關係

氣乾比重與 E_{DU} 之間有正的線性關係存在，其關係可用次述迴歸直線式表示： $E_{DU}=290.18r_v-3.0439$ ， $R^2=0.365$ ，其決定係數雖低，但經 F 值測試，其有顯著性相關 (0.05 level)。在此也可能因木材的彈性模數隨著木材比重的增加會增大，因而導致木材的超音波速與氣乾比重之間沒有顯著的相關性。

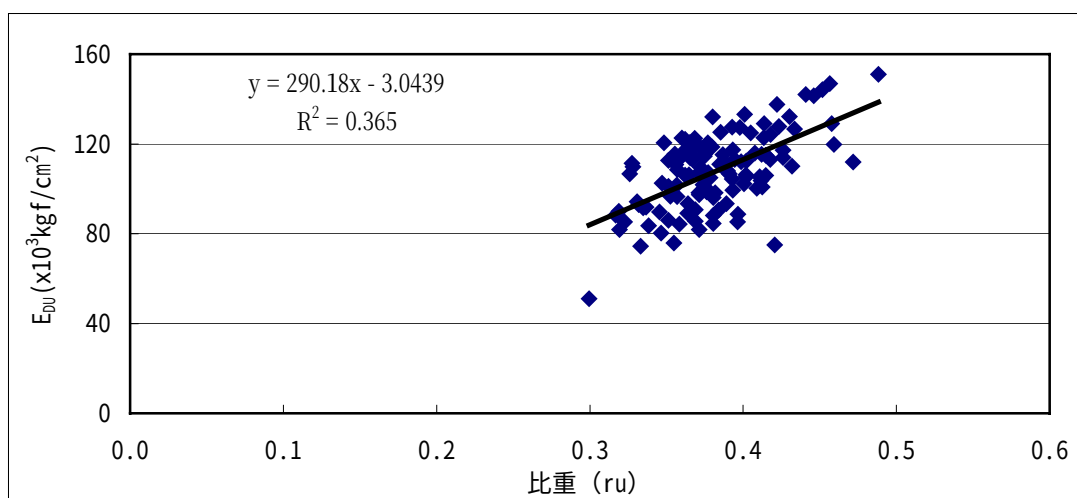


圖 3-3.5 杉木比重與 E_{DU} 的關係

(三) 超音波速與 E_{DU} 的關係

由圖 3-3.6 可看出超音波動彈性模數與超音波速之間亦有正線性關係存在，可用次述直線迴歸式表示： $E_{DU}=40.201V_U-103.16$ ， R^2 為 0.658，經 F 值測驗，其具有顯著性相關 (0.05 level)，此係因為超音波速的平方乘以比重除以重力加速度等於動彈性模數，而重力加速度為定值，比重的變化也沒有超音波速的平方變化來得大，所以超音波速與動彈性模數的相關性是可以預期的。

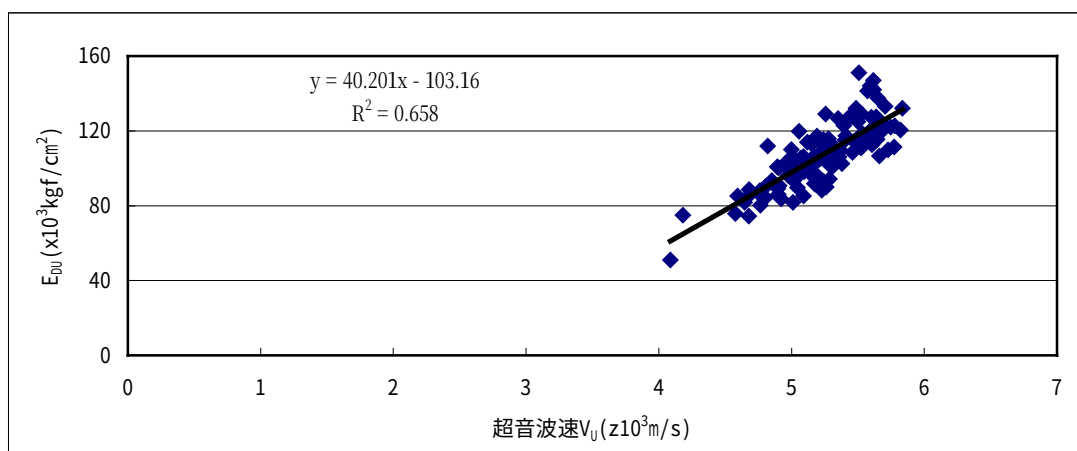


圖 3-3.6 杉木超音波速與 E_{DU} 的關係

(四) 超音波速與橫向振動動彈性模數 (E_{DT}) 的關係

由圖 3-3.7 可看出超音波速與橫向振動 (E_{DT}) 之間亦有直線迴歸關係式即 $E_{DT}=39.7V_U-108.29$ ，其 R^2 為 0.674，而超音波速與橫向振動有關，且超音波速與動彈性模數也有關係，所以可以推測：動彈性模數與橫向振動應該會有相當不錯的相關性。

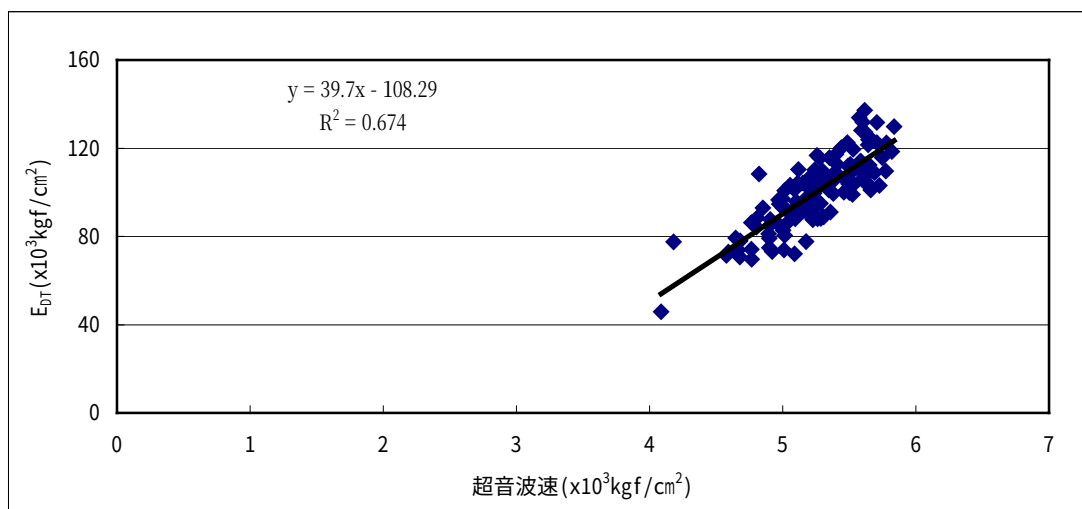


圖 3-3.7 杉木超音波速與 E_{DT} 的關係

(五) 超音波速與 MOR、MOE 的關係

由圖 3-3.8 可看出超音波速與 MOE 之間有直線關係式存在，可求得直線迴歸式為： $MOE=37.261V_U-104.64$ ，其 R^2 值為 0.469，經 F 值測驗，亦有顯著性相關 (0.05 level)，所以超音波速可說與任何的彈性模數都有密切的相關性，因此只要超音波速高，則其木材的彈性模數值也會很好。因此超音波速可作為非破壞性強度之檢測是有信賴性的。但是由圖 3-3.9 可看出 MOR 與超音波速之間雖亦有線性關係存在，但其 R^2 值為 0.243，較低，此可能係主要影響抗彎性質的因子，有木樑的形狀大小、木理傾斜角、含水率、溫度、節、荷重速度等因素，這些複雜因子未能全部由超音波速反應出來。

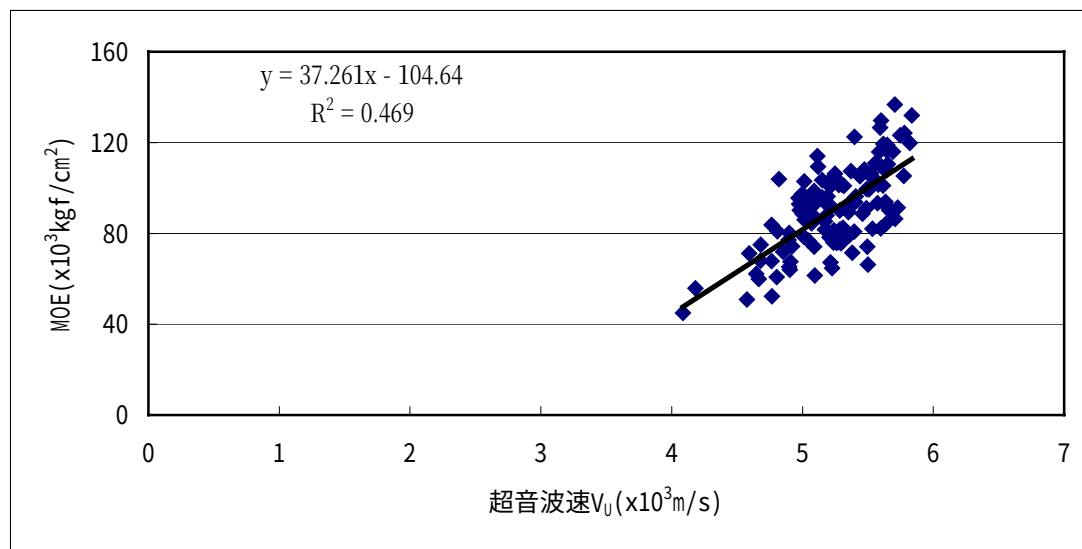


圖 3-3.8 杉木超音波速與 MOE 的關係

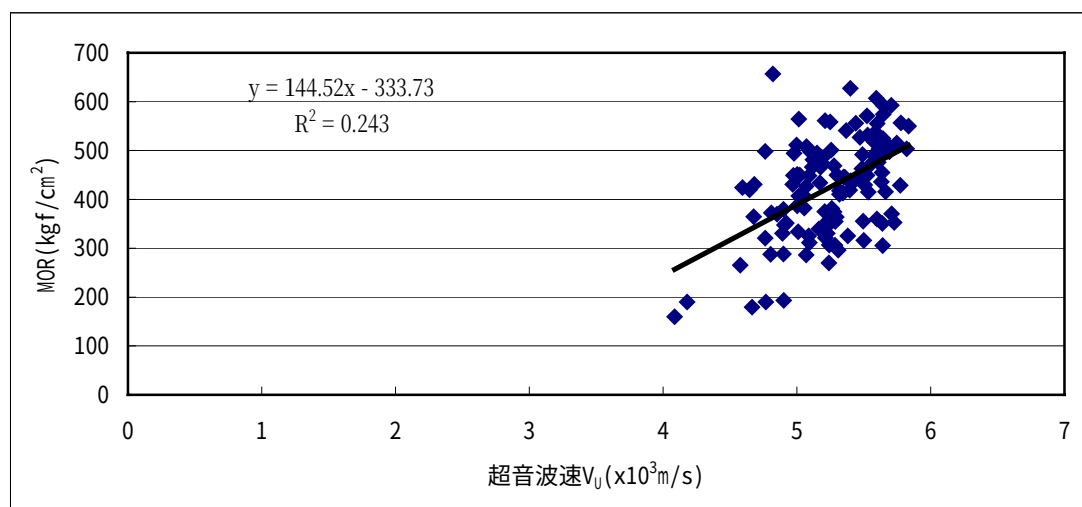


圖 3-3.9 杉木超音波速與 MOR 的關係

(六) E_{DU} 與 E_{DT} 的關係

E_{DU} 與 E_{DT} 之間有正的線性關係存在，可求得直線迴歸關係式為：
 $E_{DT} = 0.905E_{DU} - 2.498$ ，其 R^2 值為 0.861，決定係數以較前述為高，換句話

說，彈性模數之間的相關性非常的好，因此具有指標的意義。

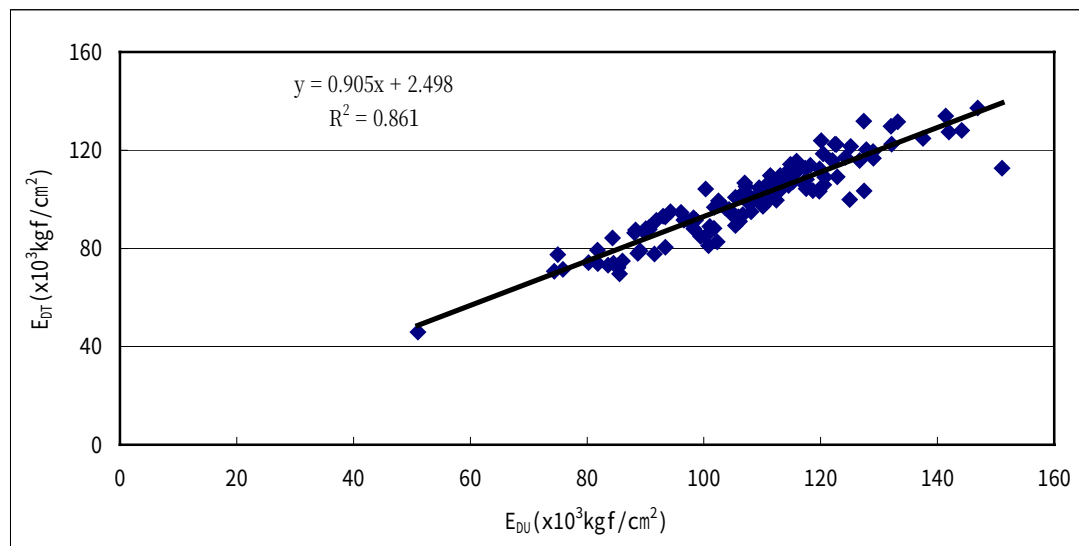


圖 3-3.10 杉木 E_{DU} 與 E_{DT} 的關係

(七) E_{DU} 與 MOR、MOE 的關係

由圖 3-3.11 可看出 E_{DU} 與 MOE 之間亦有正的線性關係存在，可求得直線迴歸式為： $MOE=0.7737E_{DU}-7.486$ ，其決定係數 R^2 為 0.497，已較前述 MOE 與 V_U 之線性關係的 R^2 值大，此可能係 E_{DU} 值已將試材氣乾的比重 (r_u) 考慮在內所致。而由圖 3-3.12 亦可看出 E_{DU} 與 MOR 之間亦有正線性關係存在，亦可求得直線迴歸關係式為： $MOR=3.351E_{DU}+63.465$ ，其 R^2 為 0.321，以較前述之 MOR 與 V_U 之直線迴歸式提高甚多，已具有相關性，其原因當然如前述因 E_{DU} 在計算時，除 V_U 值外，亦考慮試材氣乾比重所致。

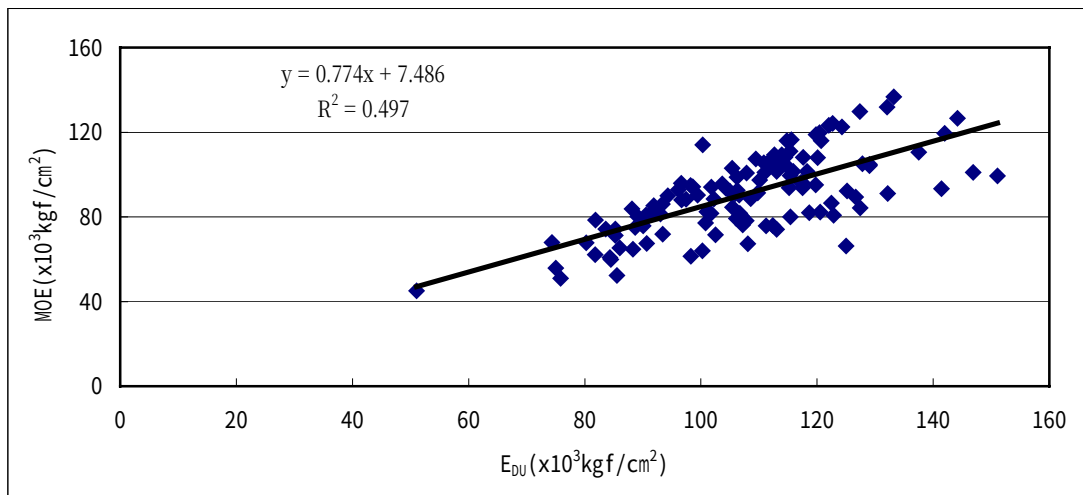


圖 3-3.11 杉木 E_{DU} 與 MOE 的關係

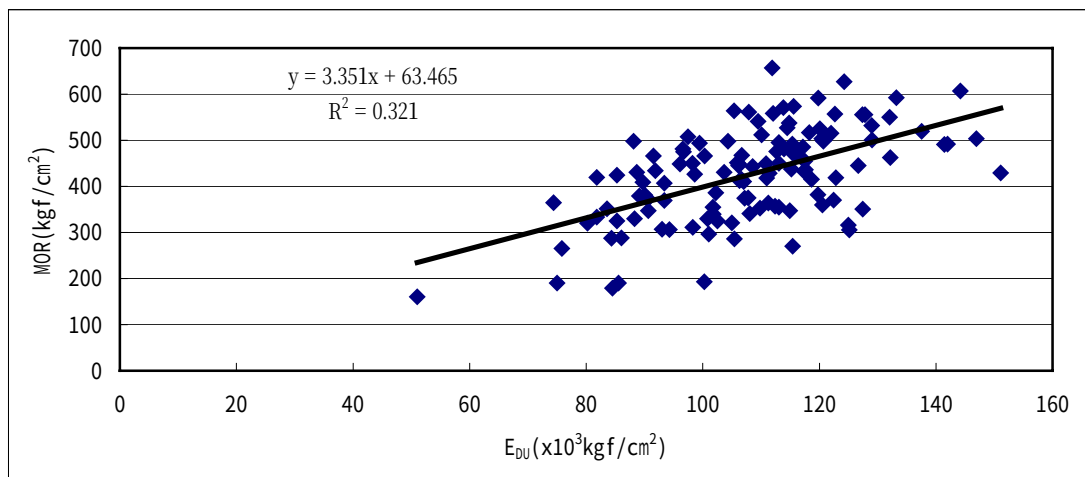


圖 3-3.12 杉木 E_{DU} 與 MOR 的關係

(八) E_{DT} 與 MOR、MOE 的關係

由圖 3-3.13 可看出 E_{DT} 與 MOE 之間亦有可求出直線迴歸式： $MOE = 0.877E_{DT} - 3.168$ ，且其 R^2 值達 0.608，相關性相當的高，而由圖 3-3.14 可看出 MOR 與 E_{DT} 之直線迴歸關係式為： $MOR = 3.843E_{DT} + 40.189$ ， R^2 為 0.401，其值雖較低，其均較前述之 MOE 與 E_{DU} 、MOR 與 E_{DU} 之間的 R^2 值為高，由其值觀之，藉由試材之撓曲橫向振動方式評估抗彎強度值之可靠

性似乎較超音波方式為高，但其試驗步驟則較為麻煩，但可透過兩者之間的高相關性，作為修正之依據。

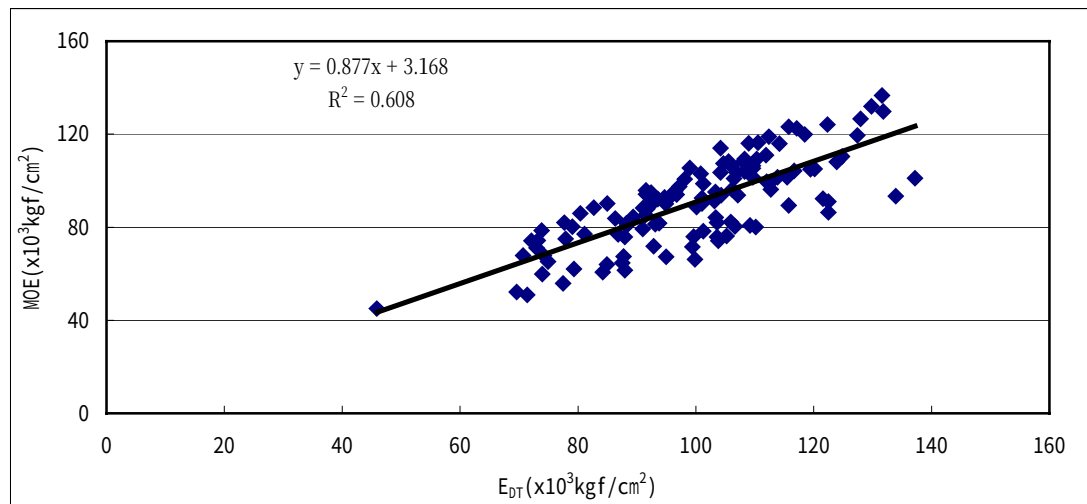


圖 3-3.13 杉木 E_{DT} 與 MOE 的關係

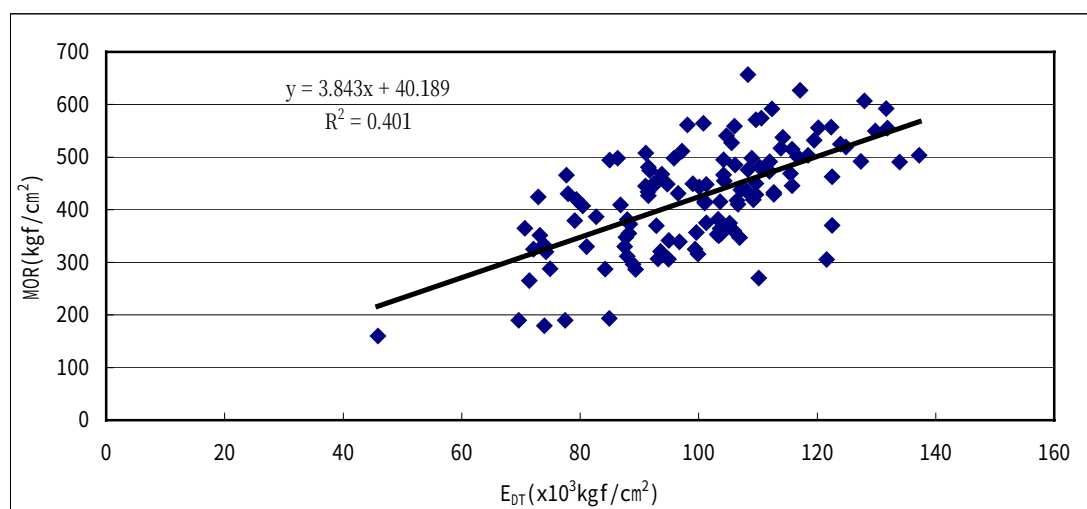


圖 3-3.14 杉木 E_{DT} 與 MOR 的關係

3-1-4 小結

由於台灣營林政策改變，未來木構造歷史建築修復能取得的木材，大多為永續經營林分取得之人工林木，與過去從天然林取得之材料性質不同，所以本研究將第三章實驗之重要結果與過去天然林木材之性質進行比較發現，杉木（福州杉）天然林與人工林之密度差異不大，但是影響其力學性質甚大之平均年輪寬，是以天然林杉木小於人工林杉木，而杉木平均年輪寬愈小，其力學性質愈好。另，天然林杉木抗彎性質也遠優於人工林杉木（表 3-4.1），所以未來修復古蹟與歷史建築時，對於木料之挑選應非常慎重，並訂定一套正確之木料規範。

表 3-4.1 杉木（福州杉）天然林與人工林木材材質之比較

樹種	容積密度數	平均年輪寬(mm)	抗彎性質 kgf/cm ²	
			MOR	MOE×10 ³
杉木（天然林）*	0.35	6.3	872±61	108.3±11.9
杉木（人工林）**	0.37 0.38	10	395 435	87.0 92.2

*：根據王松永（1995） **：根據上述實驗所得結果

3-1-5 小結

- (1) 實生林杉木之 r_u 、 V_u 、 E_{DU} 、 E_{DT} 、MOE 及 MOR 值均各會大於萌蘗林杉木 1%、3%、8%、8%、8%及 8.1%，但經 T 值檢驗，只有 V_u 、 E_{DU} 及 E_{DT} 值在兩者之間有顯著性差異，其他均無顯著性差異。雖萌蘗林杉木之強度值會稍低實生林木材，但其變異性則較小，因此從木材性質觀點觀之，萌蘗林杉木用途和實生林杉木應無差別。萌蘗林可取代實生林以降低育林成本，但只能在一個世代為限。
- (2) 杉木的氣乾比重與 E_{DU} 之間的直線迴歸式有相關性，但與超音波速之

間則無相關性存在。

(3) 杉木超音波速與 E_{DU} 、 E_{DT} 、 MOE 相互間，所得直線迴歸式均具有顯著的相關性，而與 MOR 之間則無相關性存在。

(4) 杉木 E_{DU} 、 E_{DT} 、 MOE 相互間，所得直線迴歸式均具有顯著的相關性。

(5) 杉木 E_{DU} 、 E_{DT} 、與 MOR 相互間，所得直線迴歸式，亦有顯著性存在，但其相關係數僅有 0.60 左右。

(6) 天然林杉木與人工林杉木之密度差異不大，但是影響其力學性質甚大之平均年輪寬，是以天然林杉木小於人工林杉木，而天然林杉木抗彎性質也遠優於人工林杉木。

第四章 古蹟及歷史建築大木構件損壞評估

第一節 損壞舊木料

本研究購置最常用材種福州杉（杉木，China fir，學名：*Cunninghamia lanceolata*）之損壞舊木料。木料來自於台北市孔廟西庫與西廂修復時損壞欲廢棄之楹構件。

第二節 試驗方法

首先以 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料的性質，再以目視法與超音波法將福州杉舊料依其損壞程度分段後，以 SYLVATEST 超音波儀、DmP 檢測儀檢測分段舊料徑向之損壞程度。將上述非破壞檢測後之舊木料分段，裁製成彎曲試驗試片，以 SHIMADZU 1991 年出廠之加長型萬能強度試驗機進行破壞試驗。



圖 4-2.1 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料的縱向音速示意

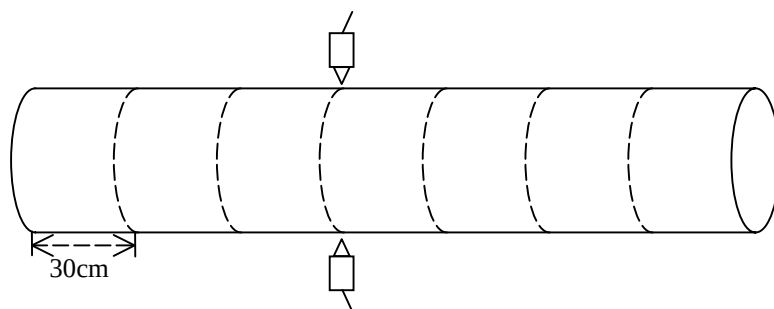
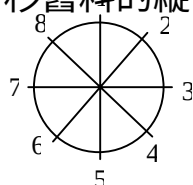


圖 4-2.2 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料的橫向音速示意

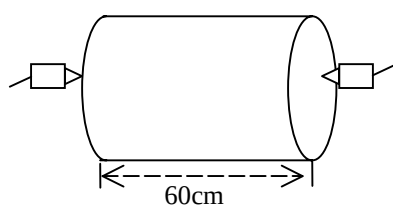


圖 4-2.3 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉舊料分段試材的縱向音速示意

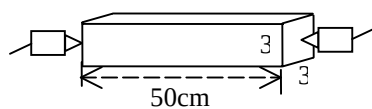


圖 4-2.4 SYLVATEST 超音波儀檢測福州杉小試材縱向音速測定示意圖

4-2-1 SYLVATEST 超音波儀

本實驗使用瑞士製 SYLVATEST 超音波儀，該儀器係以兩個壓電性 (piezo-electrical) 換能器 (transducer)，一個波動發振器 (pulse generator) 產生，另一個波動接受器 (receiver) 接受頻率為 30kHz 之超音波，由音波測定儀讀出所需時間 (t) 其單位為微秒 (Microsecond, μ s) 精度為百萬分之一秒，測其於木材中之傳播速度，藉以評估木材材質，該儀器同時可測定木材溫度 0-50°C 及含水率 0-156%。本實驗分別求出木構件舊料全試材平行方向超音波速 (圖 4-2.1) 以及每 30 公分之距離測橫向音速 (圖 4-2.2)。超音波檢測之際是將波動接收器與發振器分別固定於構件之等分單元檢測位置的兩端相對位置，共測得 4 個直徑方向 (圖 3-3.1-A)，而波動發振器所發生之衰減振動波波動是經由電氣、音響變換轉變成彈性波波動後，從大木構材之一端傳至接受器改變為電氣的信號後，由音速測定儀讀出所需時間，每一單元共測得 4 個超音波橫向傳播時間，再根據 (1) 式計算傳播速度，求其平均，即為該單元之音速。

$$V = \ell / t \quad (1)$$

V：超音波傳播速度 m/sec

ℓ ：波動發振器與接收器架設於大木構件上之間距 m

t：傳播時間 sec

然後舊料全試材依每段 60 公分之長度裁斷為小試材後，再進行縱向音波傳遞速度之測定 (圖 4-2.3)。而在裁製小試材 3×3×50cm³ 進行中央集中載重抗彎試驗前，再進行縱向音波傳遞速度之測定 (圖 4-2.4)。

4-2-2 DmP 非破壞檢測系統

本實驗所使用之 DmP 非破壞檢測系統，圖 4-2.5 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 (圖 4-2.6) 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 (如春材或腐朽的位置時)，鑽孔阻抗力下降，探針旋轉的次數便會減少。

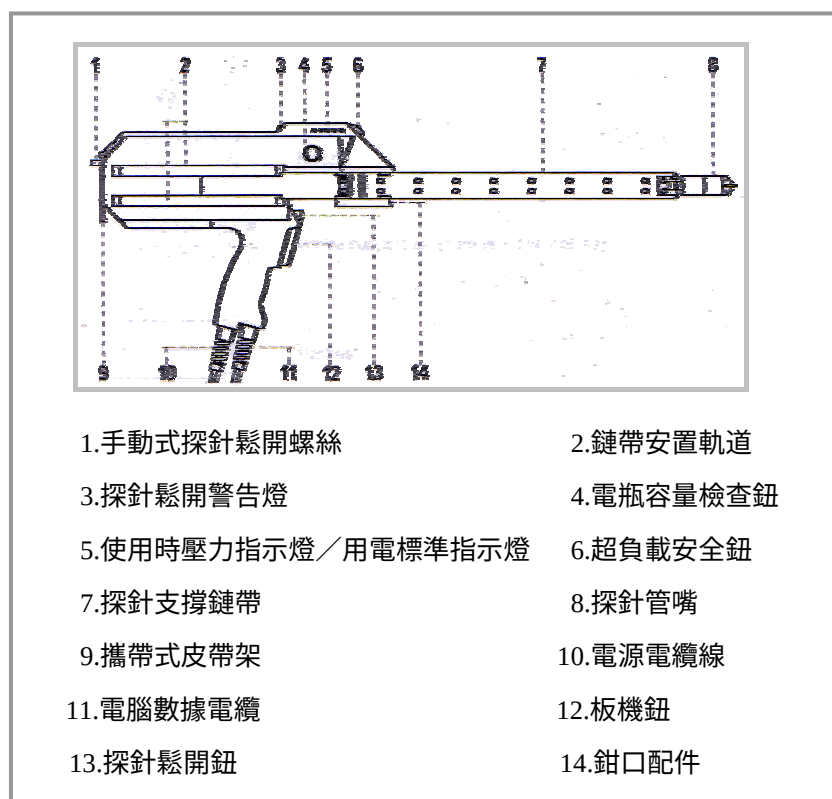


圖4-2.5 DmP (Digital microProbe) 儀器配件

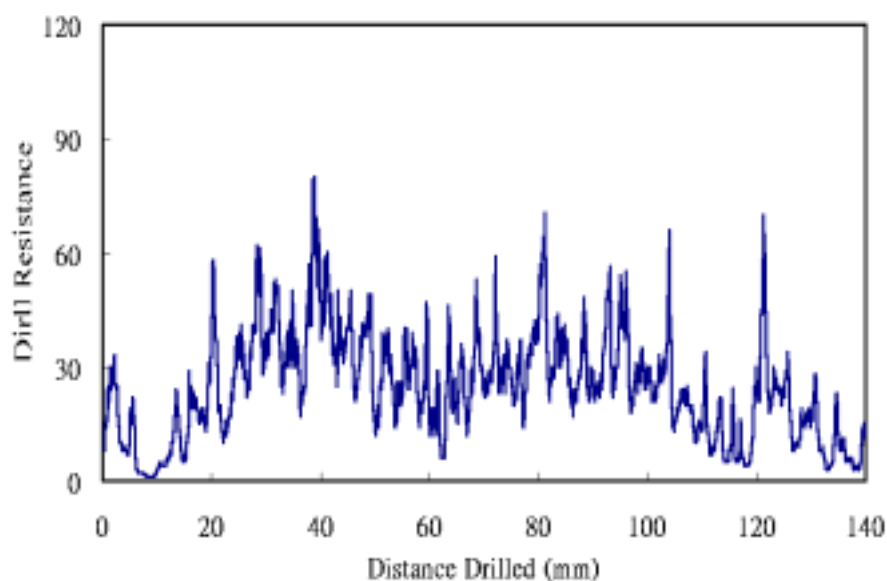


圖 4-2.6 鑽孔抵抗力分佈圖

4-2-3 萬能強度試驗機(Universal Testing Machine)

在非破壞實驗後，進行破壞性試驗，乃將前述 SYLVATEST 超音波儀檢測過之福州杉小試材 $3 \times 3 \times 50 \text{ cm}^3$ 進行中央集中載重抗彎試驗，求出其比例限度載重與撓曲，再由載重與撓曲曲線圖求出抗彎彈性模數 (MOE)、抗彎強度 (MOR)。

$$(1) \text{ 抗彎強度 (MOR)} = \frac{3P (l - l')}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$(2) \text{ 抗彎比例限 } \sigma_{bp} = \frac{3P_p (l - l')}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$(3) \text{ 抗彎彈性模數 (MOE)} = \frac{P_p (l - l') [3l^2 - 2(l - l')^2]}{8\delta_p bh^3} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

l' 為載重點間距離 (cm)

b 為長方形斷面之寬 (cm)

h 為高度 (cm)

δ_p 是為 P_p 載重時，在載重點之下〔跨距中央〕之撓曲 (cm)

l 為試片跨距 (cm)

第三節 結果與討論

4-3-1 全試材之音速值

本次試驗所得之縱向音速值均在 4763 ~ 5671 m/s (表 4-3.1)。雖符合健全材音速值之範圍，然因測定縱向音速值時係量測該材料內部健全處，其周遭腐朽處無法進行量測，因此可看出材料雖有腐朽狀況發生，然僅出現於外側邊材，材料內部仍保有相當完整之斷面。同時，將全試材依每段 60 公分之長度裁斷為小試材後，再進行縱向音波傳遞速度之測定，發現每段試材之縱向音波傳遞速度與全試材之縱向音速值並無明顯差異 (表 4-3.2)，經 F 值檢測得到如表 4-3.3 所示，無顯著性差異。因此判斷可以縱向音速值來評估試材品質。由以上之結果顯示，國內古蹟修復抽換大多僅憑木料外觀目視之判斷，材料內部仍保有相當完整之斷面應仍能承受外力，或當作其他部材再利用，因此古蹟抽換木料之標準應即時建立，方不會因修復抽換木料而減損古蹟之歷史價值與浪費資材。

表 4-3.1 台北孔廟西庫與西廂全試材之縱向音波速度

	V _L 平均值(m/s)	標準差(m/s)
西庫右間后 4	5251	170
西庫右間后 5	5220	295
西庫右間后 7	5000	171
西庫右間前 3	5329	120
西庫右間前 6	5113	105
西庫右間前 8	5182	290
西庫二-6	4763	50
西庫左間前 8	5583	362
西廂四-2	5329	121
西廂四-3	5626	152
西廂五后 3	5671	122
西廂七前 4	5257	156

表 4-3.2 台北孔廟西庫與西廂分段試材之縱向音波速度

	V _L 平均值(m/s)	標準差(m/s)
西庫右間后 4	5330	118

西庫右間后 5	5340	65
西庫右間后 7	5235	227
西庫右間前 3	5320	66
西庫右間前 6	5290	91
西庫右間前 8	5254	93
西庫二-6	5138	86
西庫左間前 8	5277	225
西廂四-2	5558	112
西廂四-3	5658	54
西廂五后 3	5574	53
西廂七前 4	5303	121

表 4-3.3 台北孔廟西庫與西廂全試材與小試材間之差異性分析

試材名稱		全試材	小試材
西庫右間后 4	V _L (m/s)Mean	5251	5330
	C.V	0.03	0.02
	significant	*	*
西庫右間后 5	V _L (m/s)Mean	5220	5340
	C.V	0.06	0.01
	significant	*	*
西庫右間后 7	V _L (m/s)Mean	5000	5235
	C.V	0.03	0.04
	significant	*	*
西庫右間前 3	V _L (m/s)Mean	5329	5277
	C.V	0.02	0.04
	significant	*	*
西庫右間前 6	V _L (m/s)Mean	5113	5290
	C.V	0.02	0.02
	significant	*	*
西庫右間前 8	V _L (m/s)Mean	5182	5254
	C.V	0.06	0.02
	significant	*	*
西庫二-6	V _L (m/s)Mean	4763	5320
	C.V	0.01	0.01
	significant	*	*
西庫左間前 8	V _L (m/s)Mean	5583	5290
	C.V	0.06	0.02
	significant	*	*
西廂四-2	V _L (m/s)Mean	5329	5558
	C.V	0.02	0.02
	significant	*	*
	V _L (m/s)Mean	5626	5658

西廂四-3	V_L (m/s)Mean	5626	5658
	significant	0.03	0.01
西廂五后 3	V_L (m/s)Mean	5671	5574
	C.V	0.02	0.01
	significant	*	*
西廂七前 4	V_L (m/s)Mean	5257	5303
	C.V	0.03	0.02
	significant	*	*

4-3-2 各分段試材之音速值與抗彎性質

將各分段試材進行音速值與抗彎性質試驗（表 4-3.4），其結果可發現 MOE 由 61080 109010 kgf/cm²，MOR 則為 450 1062 kgf/cm²，將音速值與 MOE、MOR 進行回歸分析，可發現其 R² 值分別為 0.34、0.27（圖 4-3.1、圖 4-3.2），其值雖小，然 F 值仍達極顯著狀態，另考慮密度之影響，以密度與 MOE、MOR 進行回歸分析，亦可發現其呈一正相關趨勢，R² 值分別為 0.44、0.39（圖 4-3.3、圖 4-3.4）。當考慮音速值與密度值之關係，而以音速值動彈性模數（MOEdv）之形式與 MOE、MOR 進行回歸分析時，則可發現其 R² 值分別提高至 0.63、0.53（圖 4-3.5、圖 4-3.6）。由此可究明在評估試材品質時，可藉由音波之傳遞速度與其本身之密度來達成。

表 4-3.4 台北孔廟西庫與西廂各分段試材進行音速值與抗彎性質

編號		V(m/s)	MOE(kgfc ²)	MOR(kgfc ²)
西庫右間后 4	1	5439	83123	688
	2	5463	76512	589
	3	5378	84957	650
	4	5118	72462	644
西庫右間前 8	1	5215	77546	570
	2	5287	77097	580
	3	5251	74401	596
	4	5371	87072	729
	5	5235	71164	573
西庫右間后 7	1	4746	65041	568
	2	4941	64801	568
	3	5020	66377	548
	4	5379	70367	564
	1	5126	70767	526
	2	5216	73342	526

	3	5233	76516	588
	4	5266	70251	544
	5	5143	73726	623
西廂四-3	1	5519	96300	887
	2	5714	101715	935
	3	5798	95298	809
	4	5765	104207	987
西庫二-6	1	4978	68333	559
	2	4918	68667	520
	3	5361	82311	565
西庫右間前 6	1	5349	75225	584
	2	5182	72436	548
	3	5323	66273	544
	4	5141	65100	525
	5	5283	69660	476
西庫右間前 3	1	5330	94859	663
	2	5368	81171	517
	3	5335	74899	545
西廂五后 3	1	5671	80516	665
	2	5704	77022	675
	3	5668	78791	646
	4	5739	76940	611
	5	5722	78046	651
西廂四-2	1	5528	109012	1062
	2	5581	95942	926
	3	5613	95815	779
西庫左間前 8	1	5301	61084	535
西廂七前 4	1	5571	69287	522
	2	5560	80506	552
	3	5516	70278	663

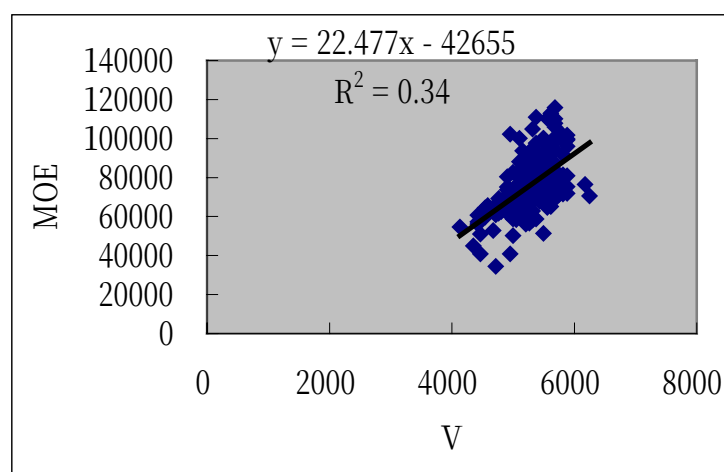


圖 4-3.1 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之音速值與 MOE 之關係圖

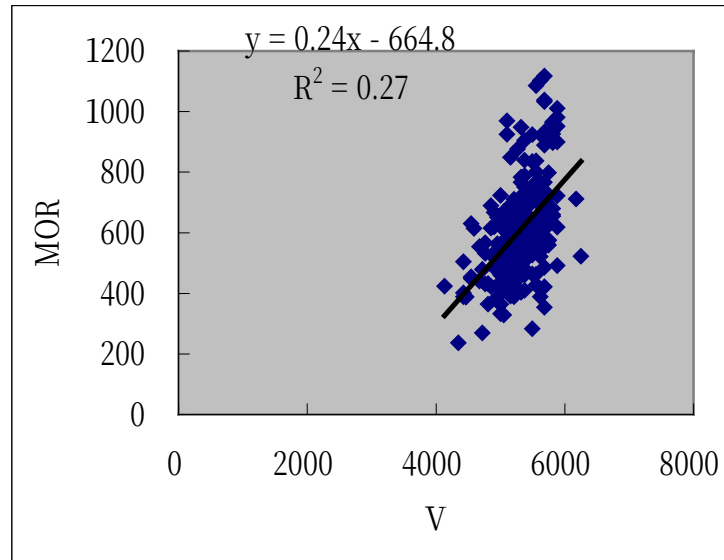


圖 4-3.2 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之音速值與 MOR 之關係圖

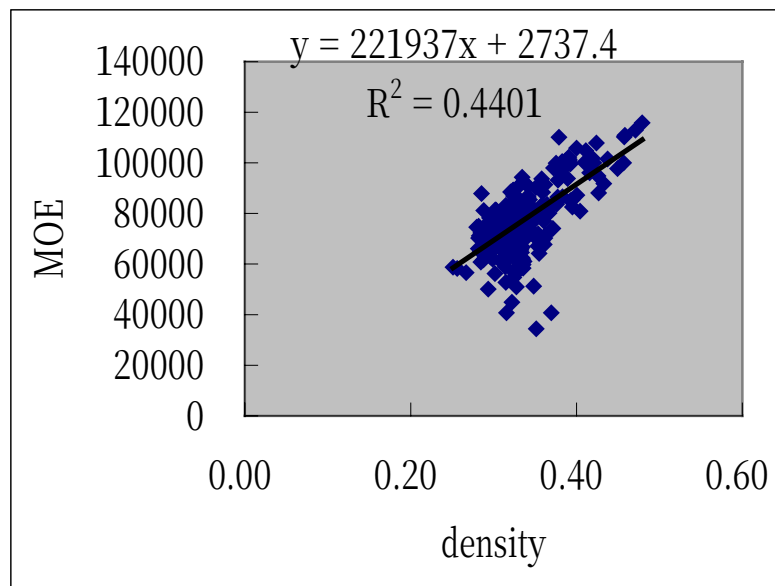


圖 4-3.3 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之密度值與 MOE 之關係圖

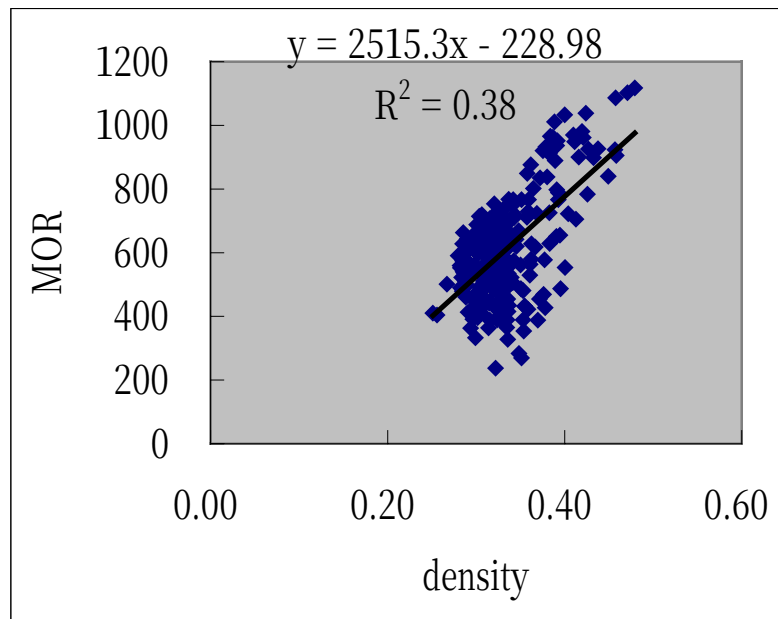


圖 4-3.4 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之密度值與 MOR 之關係圖

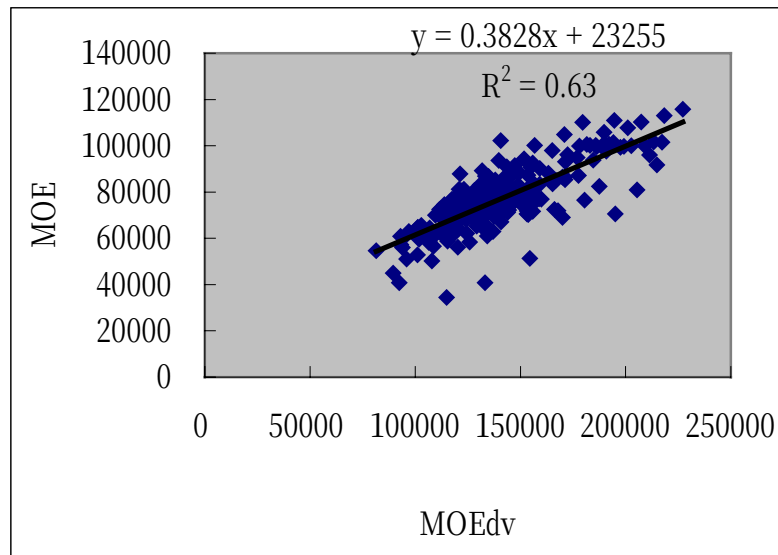


圖 4-3.5 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之動彈性模數與 MOE 之關係

圖

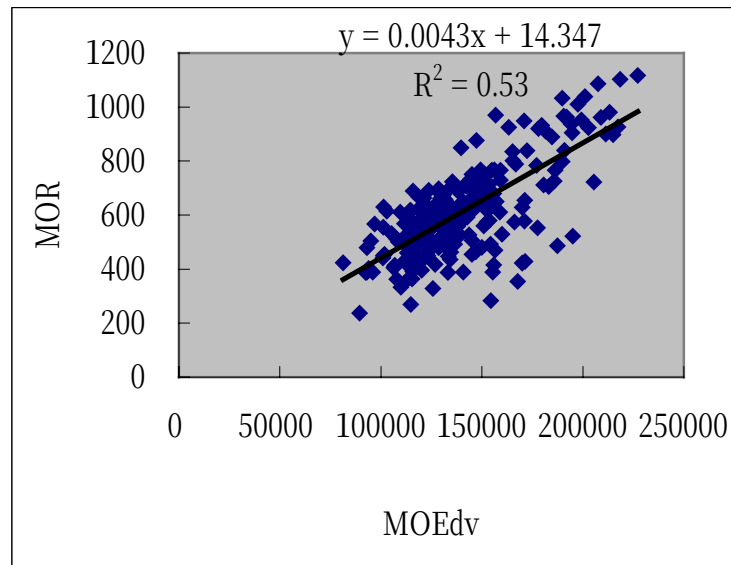


圖 4-3.6 台北孔廟西庫與西廂各分段試材之動彈性模數與 MOR 之關係

圖

4-3-3 試材橫向音速值分析

因古蹟現場對於梁與柱均無法進行縱向超音波測定，惟有可進行橫向音速值之檢測部份，因此本次試驗就全試材每間隔 30cm 區隔為一小段，分別進行橫向音速之檢測，其結果如圖 4-3.7~4-3.18。由圖 4-3.7 可看出西庫右間后 4 試材，經橫向音速測定，僅端部受到損害，試材中央段（90~240cm）仍屬健全，音速值尚保有約 1300m/s。由圖 4-3.8 可看出西庫右間后 5 試材除 210~240cm 段橫向音速值在 1000~1200 m/s 外，其餘均低於 1000 m/s；圖 4-3.9、4-3.10、4-3.14、4-3.15、4-3.17 之西庫右間后 7、西庫右間前 3、西庫左間前 8、西廂四-2、西廂五后 3 則多均在 1000 m/s 以下，因此該材料亦難以再利用。圖 4-3.18 之西廂七前 4，在 60~240cm 範圍內，橫向音速值均在 1300 m/s 以上。

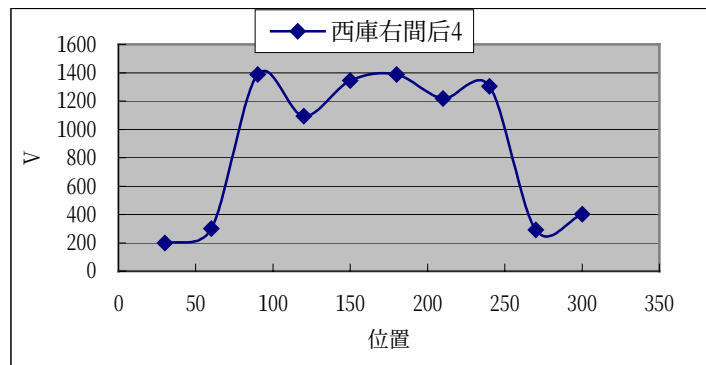


圖 4-3.7 西庫右間后 4 試材之橫向音速變化圖

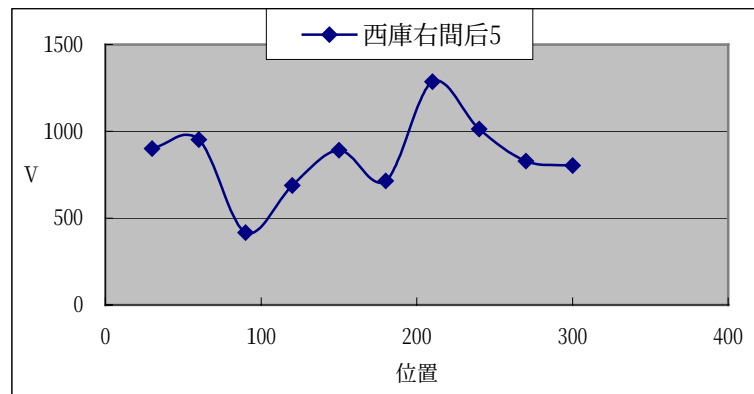


圖 4-3.8 西庫右間后 5 試材之橫向音速變化圖

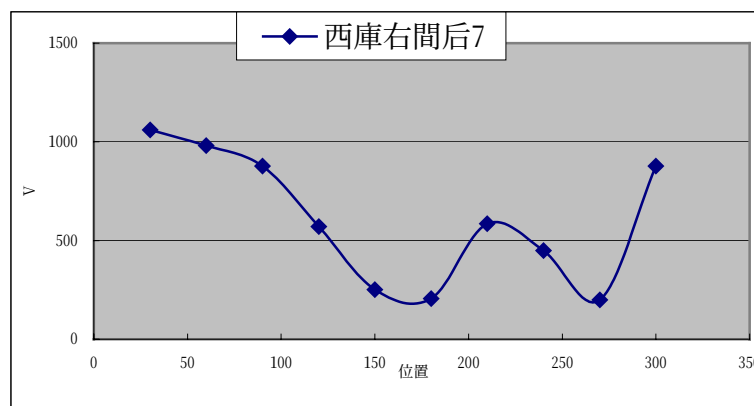


圖 4-3.9 西庫右間后 7 試材之橫向音速變化圖

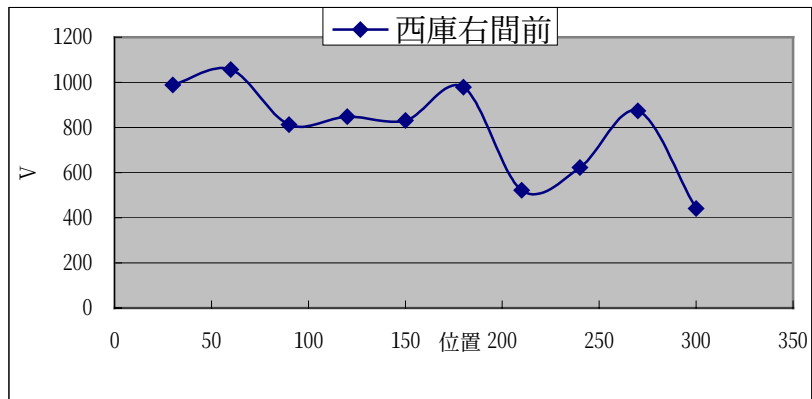


圖 4-3.10 西庫右間前 3 試材之橫向音速變化圖

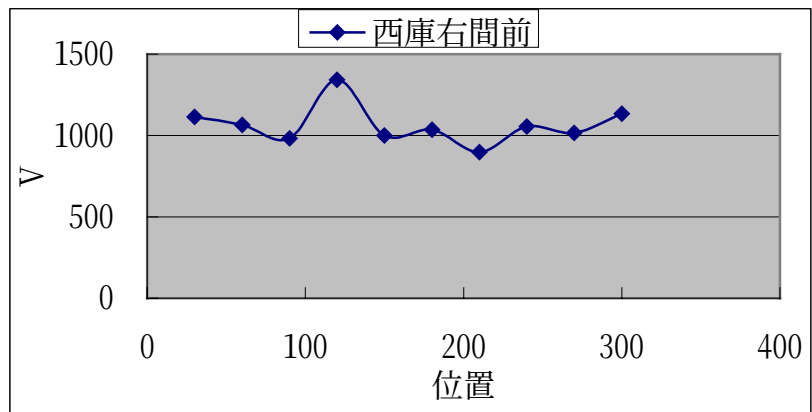


圖 4-3.11 西庫右間前 6 試材之橫向音速變化圖

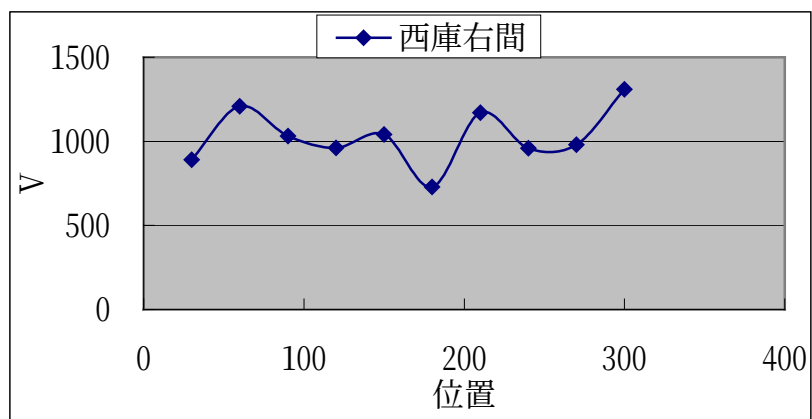


圖 4-3.12 西庫右間前 8 試材之橫向音速變化圖

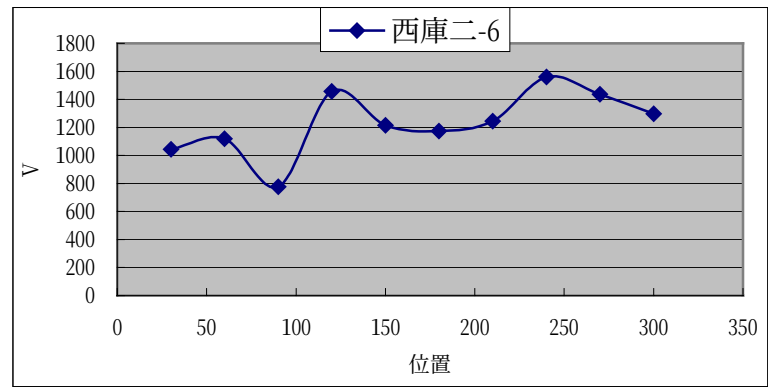


圖 4-3.13 西庫二-6 試材之橫向音速變化圖

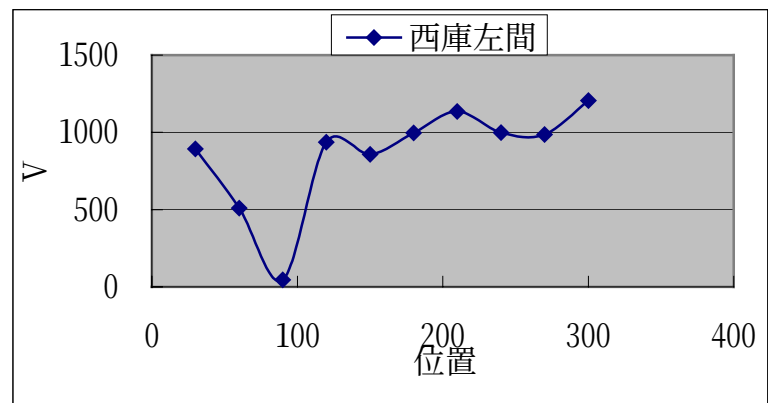


圖 4-3.14 西庫左間前 8 試材之橫向音速變化圖

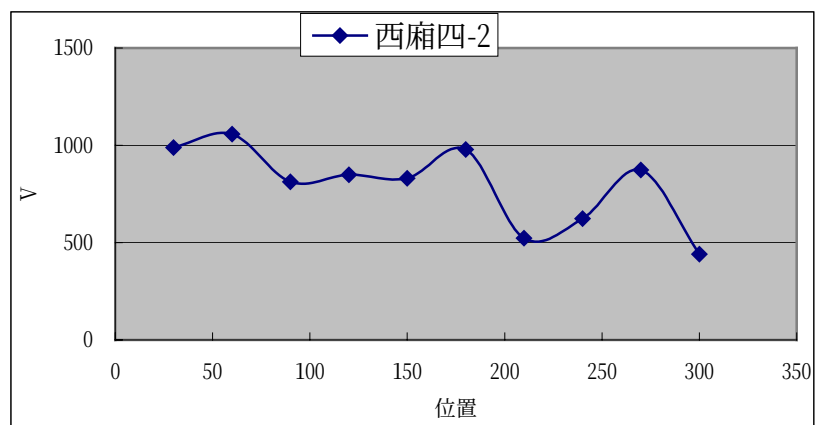


圖 4-3.15 西廂四-2 試材之橫向音速變化圖

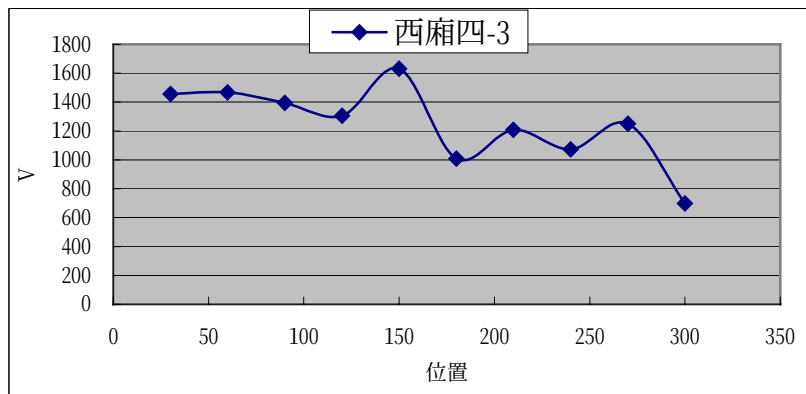


圖 4-3.16 西廂四-3 試材之橫向音速變化圖

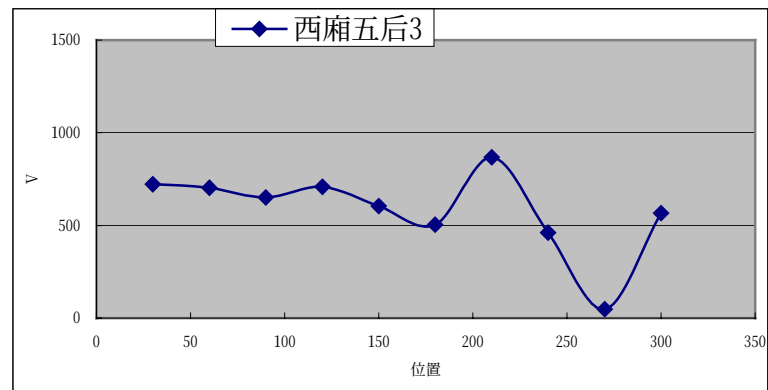


圖 4-3.17 西廂五后 3 試材之橫向音速變化圖

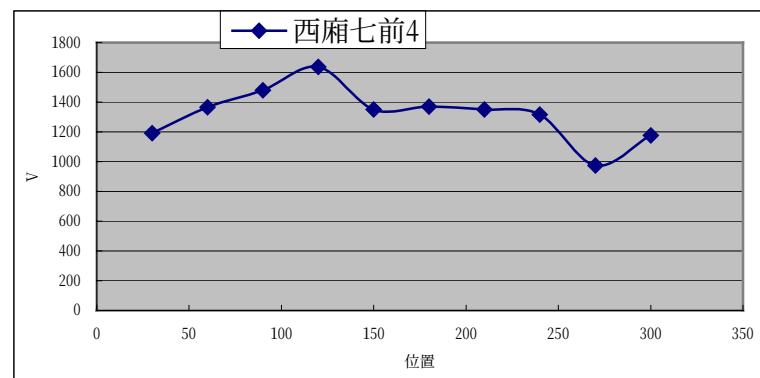


圖 4-3.18 西廂七前 4 試材之橫向音速變化圖

4-3-4 DMP 檢測木構件斷面損壞之適用性

本試驗係利用超音波與 DMP，以非破壞的方式來檢測古蹟材料上的缺點與損壞情形，而超音波檢測後，以 DMP 來加以確認損壞的情形。

將材料橫斷面以順時針方向編號為 1~8 號方向，進行 1-5 方向、2-6 方向、3-7 方向及 4-8 方向的橫向超音波量測（圖 4-2.2），而當超音波顯示不良時，再利用 DMP 進行進一步的檢測其損壞情形。

其中圖 4-3.19 含水率為 22 %，橫向超音波速(V_R)在 1-5 的方向為 1020 m/s，2-6 方向為 1094 m/s，3-7 方向為 1020 m/s，4-8 方向為 794 m/s，而從 V_R 值而言，4-8 方向應該有缺點的存在，因此利用 DMP 在 4-8 方向進行檢測，發現於髓心處偏 4 號方向有一開裂的缺點存在，而將斷面剖面圖與 DMP 所鑽之圖譜進行疊合比對，更可證明此一缺點的存在，同時當 DMP 鑽到此缺點時，其阻抗值突然下降，比一般春材的阻抗值還低，顯示此裂隙的存在，由 DMP 圖譜進行裂隙的推測得知，位於 4-8 的連線上，該裂隙的寬度約為 0.5 cm，因此以 DMP 及超音波檢測，在技術上是可以檢測出古蹟材料的裂隙缺點。圖 4-3.20 中亦在 4-8 方向的 V_R 值為最低，含水率為 16.7 %，在髓心處亦有開裂，而 DMP 圖譜上顯示出此材料的開裂為 0.1 cm，同時在靠近 4 號位置且平行 DMP 鑽入方向的位置上，有一微小開裂，使得靠近 4 號方向的部分秋材所鑽取得的圖譜，有比其他秋材所得到的抵抗值微低的現象。

圖 4-3.21 的含水率為 21.7 %， V_R 值以 2-6 方向所得到的數值最低，而以 DMP 所得到的圖譜阻抗值所顯示的結果，在 6 號位置靠近樹皮的部分有約 0.5 cm 的腐朽空洞，和斷面照片相疊合可得到相同的結果，而由 DMP 圖譜，亦可換算出其腐朽率為 2.7 %。基本上此斷面的超音波值較大，因此顯示出此材料的材質較佳，由 DMP 圖譜所得到的結果可看出此材料的年輪緻密，其平均年輪寬約為 0.38 cm。由圖 4-3.22 顯示出此斷面平均年輪寬為 0.82 cm，而在 3 號方向有一與 3-7 方向平行之開裂，同時亦在圖譜上顯示出，當從 3 號方向鑽入時，DMP 遇到此裂隙，使其阻抗無法達到預期之阻抗值，而其他方向，在含水率 33 %

的情況下，超音波速亦還有平均約 1000 m/s 的數值，顯示該材料於其他方向的材質應無較大的缺點或損傷。

圖 4-3.23 由超音波顯示出，在 1-5 方向有缺點存在，而此材料的含水率為 21.9 %，於 1 號方向的外側邊材有一約 2.2 cm 的腐朽，由 DMP 阻抗圖譜來換算，可得到腐朽率約為 11.9 %，而由此亦可得到，當材料有腐朽的缺點存在時，DMP 亦有阻抗值變小的情形出現，故利用 DMP 來檢測木質材料的腐朽情形亦十分恰當。圖 4-3.24 由斷面照片來看，此材料有嚴重心腐的狀況，含水率為 20.9 %，利用超音波檢測的結果，在 4-8 方向有明顯的超音波速數值偏低的現象，而由 DMP 圖譜的結果，亦可顯示出材料心腐的程度，經過換算後，其髓心腐朽長度約為 9.1 cm，腐朽率約為 42.9 %，故超音波及 DMP 對腐朽的情形亦可掌握。

圖 4-3.25 的含水率為 14.7 %，經由超音波的檢測後，在 1-5 方向的 V_R 值為 945 m/s，2-6 方向為 1274 m/s，3-7 方向為 1073 m/s，4-8 方向為 664 m/s，以 4-8 方向的超音波速數值最低，再經由 DMP 檢測後，由圖譜的結果顯示，在 4 號位置的外側邊材，有一約 0.6 cm 的腐朽空洞，換算腐朽率約為 3.0 %。

圖 4-3.26 的含水率約為 18.2 %，由斷面照片圖看起來，在 3 號及 7 號位置的外側，皆有大小不一的腐朽空洞，經由超音波檢測的結果顯示出，於 3-7 方向有缺點的存在，再經由 DMP 的阻抗圖譜來看，在 3 號位置的腐朽空洞長約 0.8 cm，在 7 號位置的腐朽空洞約為 0.4 cm，換算腐朽率約為 5.85 %。

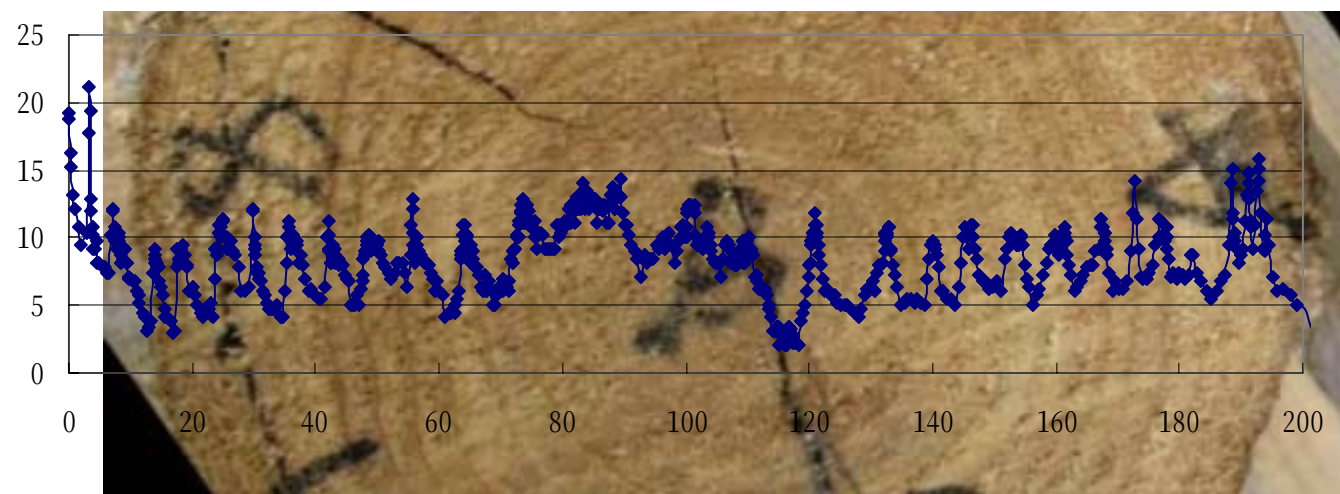
圖 4-3.27 的含水率為 23.7 %，其超音波速數值在 2-6 方向及 3-7 方向皆有明顯的降低，而以 2-6 方向為最小，經由 DMP 圖譜的檢測，而得到於 6 號方向有一小小的腐朽空洞及一平行 2-6 鑽取方向的裂隙，因此造成超音波速數值的降低是可以理解的。

圖 4-3.28 的含水率為 16.5 %，由斷面剖面圖來看，有多數環狀的腐朽及由髓心放射狀的開裂，利用超音波儀進行檢測，得到 1-5 方向的 V_R 值為 654 m/s，經由 DMP 檢測可顯示出，環裂腐朽的存在及髓心處

的開裂。

圖 4-3.29 及圖 4-3.30 其含水率分別為 33.6 %、16.2 %，由橫斷面剖面圖看來，沒有嚴重的缺點存在，而經由超音波儀的檢測結果看來，前者的 V_R 值的平均約為 1200 m/s，經由 DMP 圖譜的檢測，亦無缺點的存在，而平均年輪寬為 0.82 cm，而後者的超音波速值平均約為 1000 m/s，同時 4 個方向的超音波速亦無異常，由前者的圖譜與超音波速數值的結果來推測，此材料應無缺點的存在，再由斷面剖面圖看來所得到 3-7 方向的結果與推測相符，是故超音波與 DMP 的檢測應用於古蹟材料之缺點及老化的判定上，有一定的可信度。

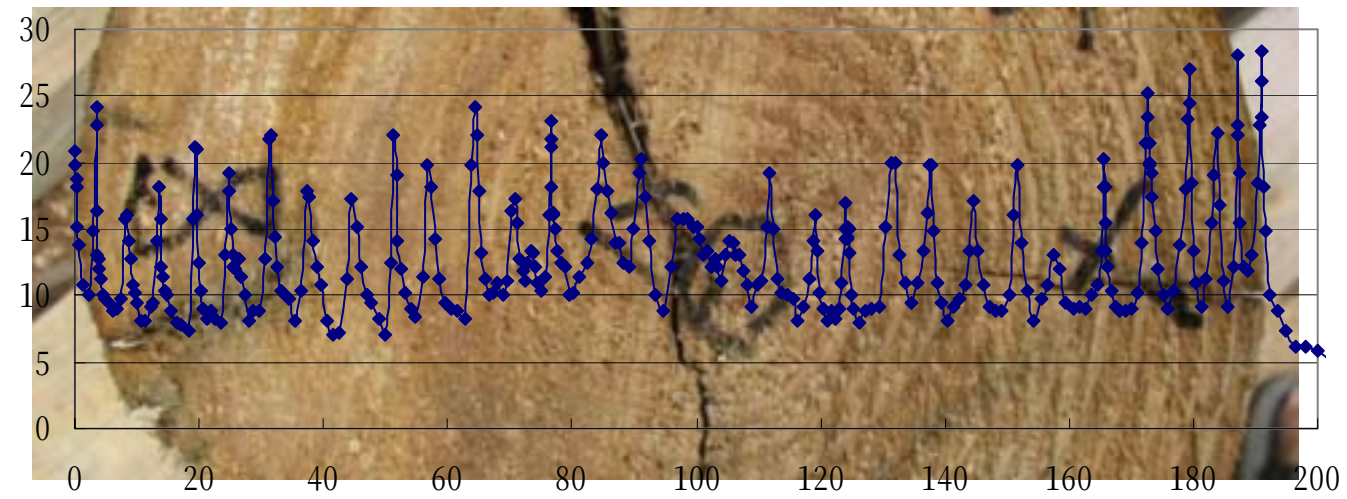
圖 4-3.19 台北孔廟西庫右間前 6 (距 A 端 90 cm) 木構件 DMP 檢測結果



含水率=22.0%

方向	直徑	超音波波速
1-5	20	1020.41
2-6	21	1093.75
3-7	20	1020.41
4-8	20	793.65

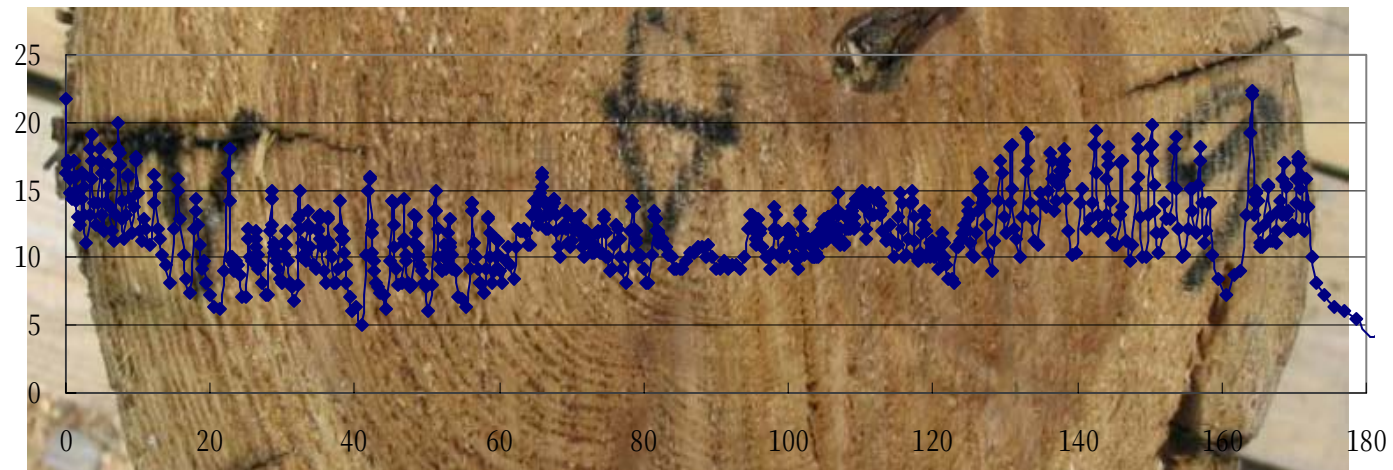
圖 4-3.20 台北孔廟西廂五后 3（距 A 端 300 cm）木構件 DMP 檢測結果



含水率=16.7%

方向	直徑	超音波波速
1-5	18.5	515.32
2-6	19.2	845.81
3-7	20	471.70
4-8	19.9	436.40

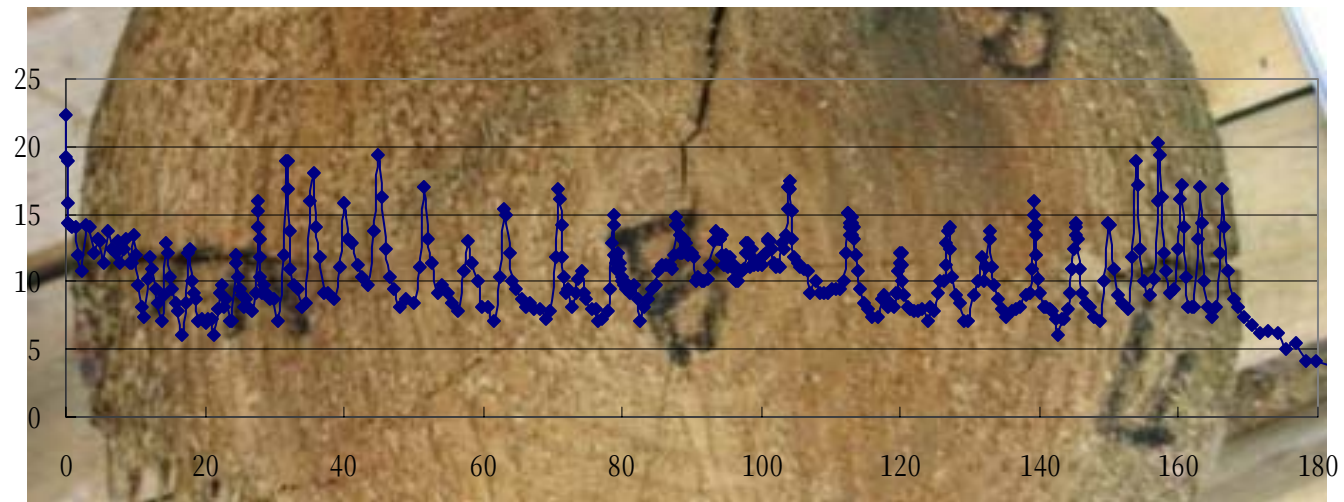
圖 4-3.21 台北孔廟西廂四-3 (距 A 端 60 cm) 木構件 DMP 檢測結果



含水率=21.7%

方向	直徑	超音波波速
1-5	19	1727.27
2-6	18.5	943.88
3-7	18.6	1430.77
4-8	21.2	1766.67

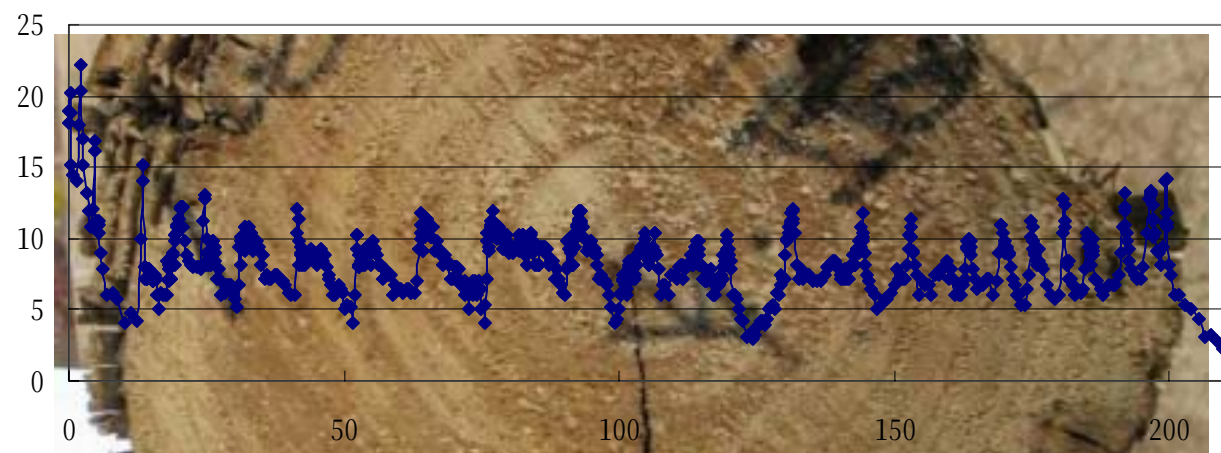
圖 4-3.22 台北孔廟西庫右間前 8（距 A 端 120 cm）木構件 DMP 檢測結果



含水率=33.0%

方向	直徑	超音波波速
1-5	18.5	943.88
2-6	18	994.48
3-7	18	814.48
4-8	17.5	1093.75

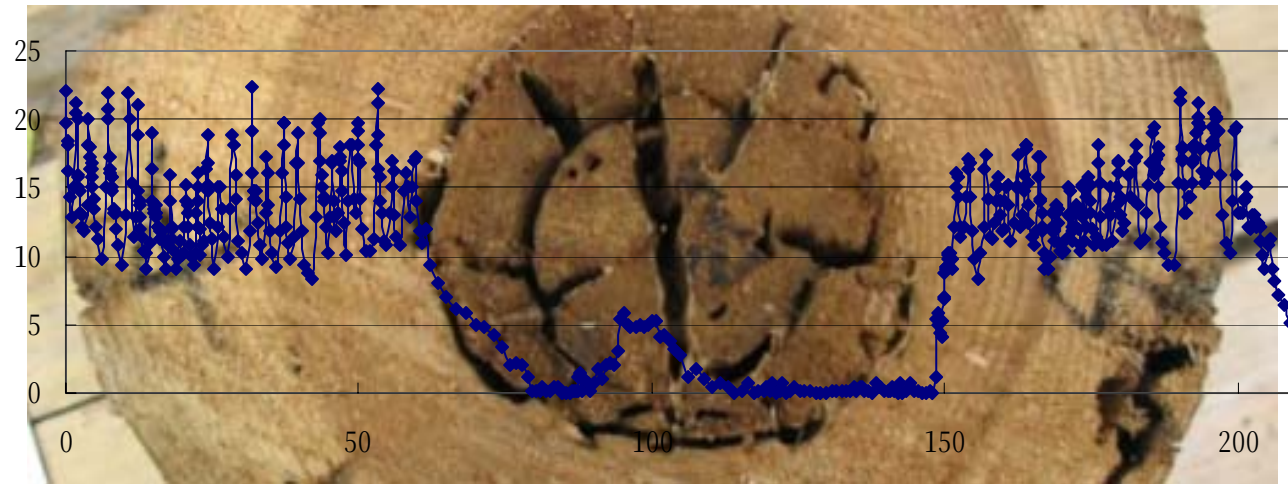
圖 4-3.23 台北孔廟西庫右間后 7（距 A 端 90 cm）木構件 DMP 檢測結果



含水率=21.9%

方向	直徑	超音波波速
1-5	18.5	646.85
2-6	17.3	905.76
3-7	19	954.77
4-8	19.7	1000.00

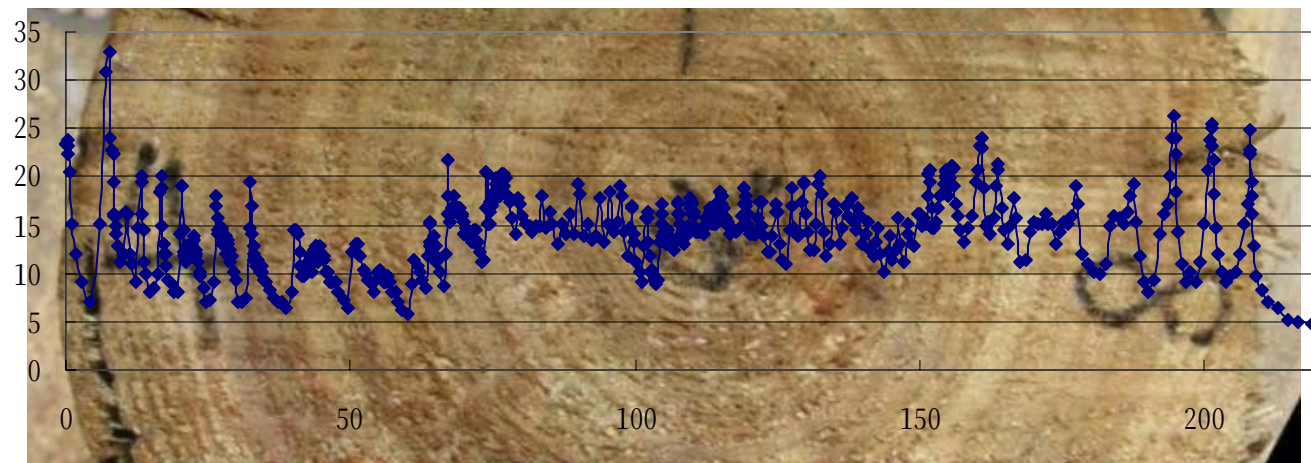
圖 4-3.24 台北孔廟西廂四-3 (距 A 端 300 cm) 木構件 DMP 檢測結果



含水率=20.9%

方向	直徑	超音波波速
1-5	19	633.33
2-6	18.5	804.35
3-7	18.6	759.18
4-8	21.2	593.84

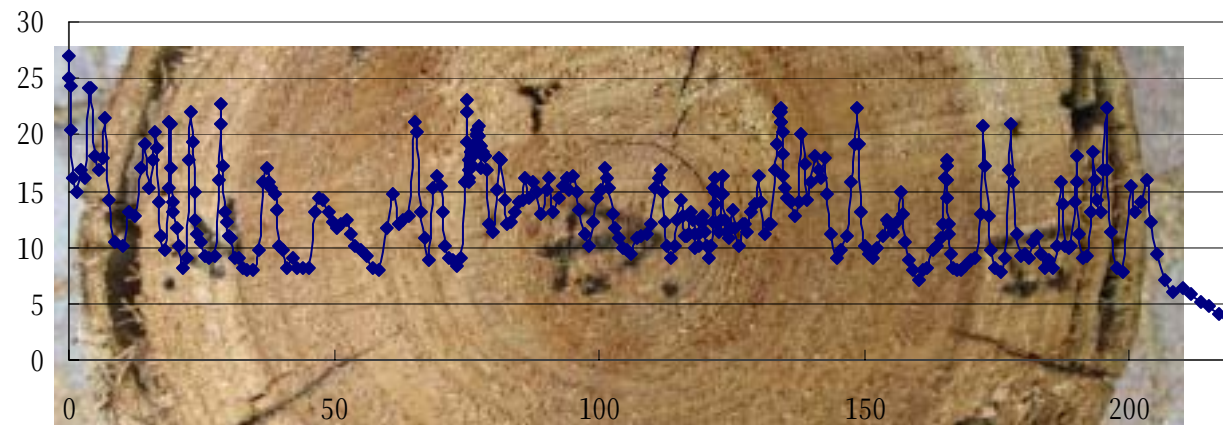
圖 4-3.25 台北孔廟西庫右間前 3 (距 A 端 30 cm) 木構件 DMP 檢測結果



含水率=14.7%

方向	直徑	超音波波速
1-5	19	945.27
2-6	20	1273.89
3-7	20.5	1073.30
4-8	20	664.45

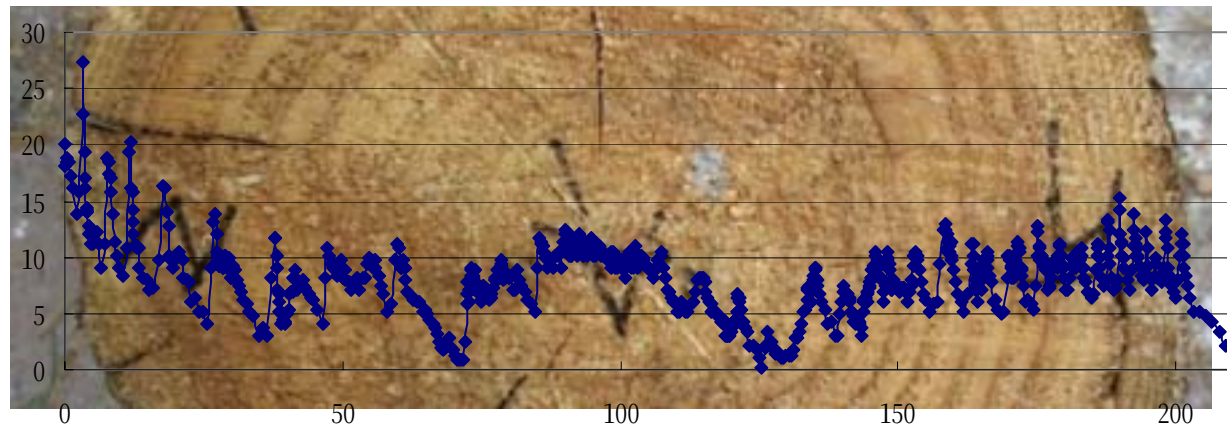
圖 4-3.26 台北孔廟西庫右間前 3 (距 A 端 270 cm) 木構件 DMP 檢測結果



含水率=18.2%

方向	直徑	超音波波速
1-5	19	1005.29
2-6	20	1010.10
3-7	20.5	401.96
4-8	20	1075.27

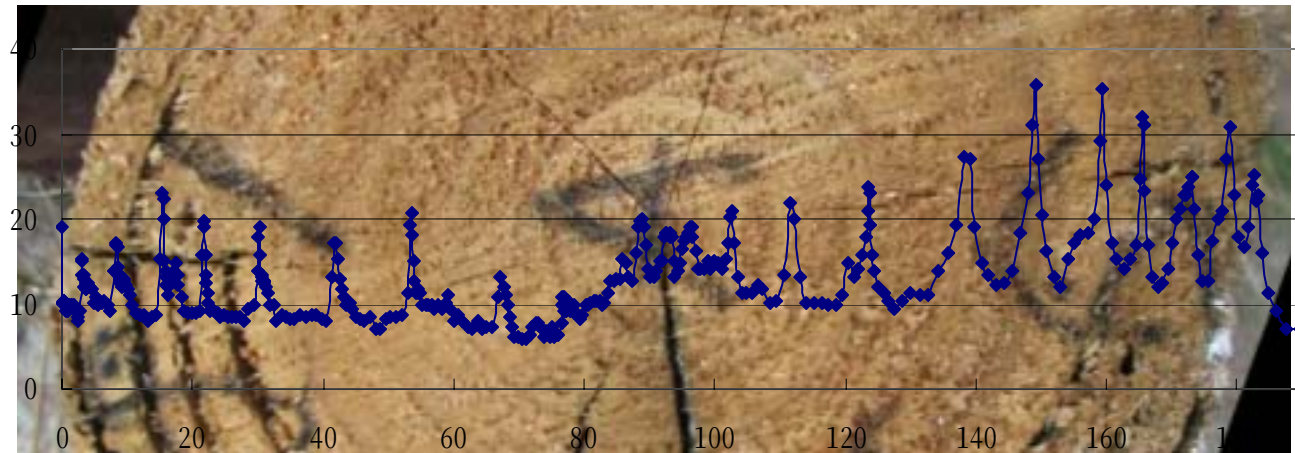
圖 4-3.27 台北孔廟西庫二-6（距 A 端 60 cm）木構件 DMP 檢測結果



含水率=23.7%

方向	直徑	超音波波速
1-5	16.8	1615.38
2-6	17.2	587.03
3-7	17.5	665.40
4-8	18	1607.14

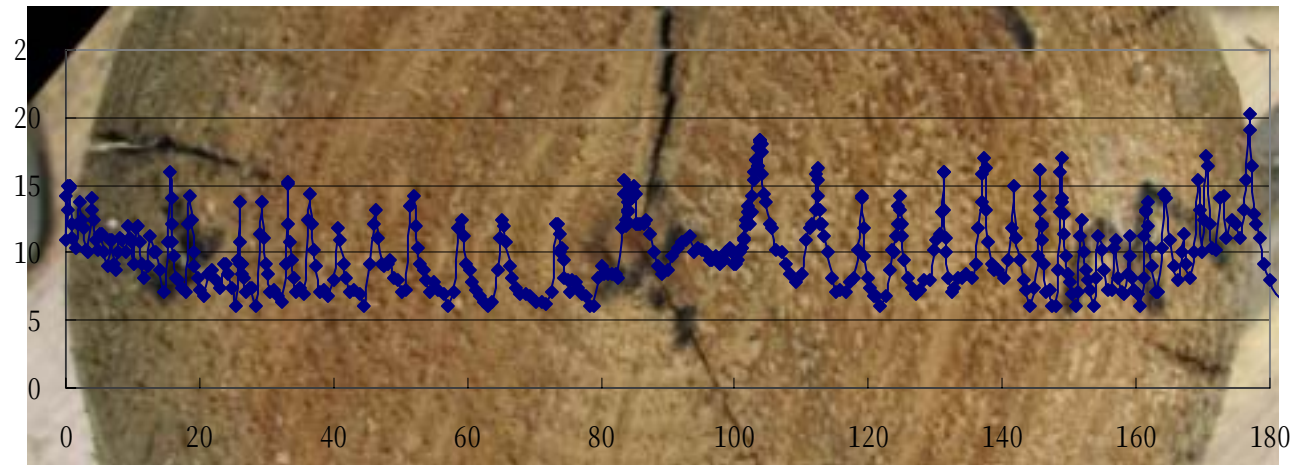
圖 4-3.28 台北孔廟西庫右間后 4（距 A 端 30 cm）木構件 DMP 檢測結果



含水率=16.5%

方向	直徑	超音波波速
1-5	18.7	653.85

圖 4-3.29 台北孔廟西庫右間前 8（距 A 端 60 cm）木構件 DMP 檢測結果



含水率=33.6%

方向	直徑	超音波波速
1-5	18.5	1241.61
2-6	18	1267.61
3-7	18	1232.88
4-8	17.5	1093.75

圖 4-3.30 台北孔廟西庫左間前 8 (距 A 端 300 cm) 木構件



含水率=16.2%

方向	直徑	超音波波速
1-5	18	983.61
2-6	19	1043.96
3-7	19	1775.70
4-8	17.5	1023.39

4-3-5 小結

- (1) 本研究以超音波儀檢測台北孔廟抽換舊木料內部健全處之縱向音速值均在 4763 ~ 5671 m/s，符合健全材音速值之範圍。目視判斷試材僅周遭腐朽（近外側邊材），材料內部仍保有相當完整之斷面。結果顯示，國內古蹟修復抽換大多僅憑木料外觀目視之判斷，材料內部仍保有相當完整之斷面應仍能承受外力，或當作其他部材再利用，因此古蹟抽換木料之標準應即時建立，方不會因修復抽換木料而減損古蹟之歷史價值與浪費資材。
- (2) 將全試材依每段 60 公分之長度裁斷為小試材後，再進行縱向音波傳遞速度之測定，發現每段試材之縱向音波傳遞速度與全試材之縱向音速值並無明顯差異，經 F 值檢測無顯著性差異。因此判斷可以縱向音速值來評估試材品質。
- (3) 將各分段試材進行音速值與抗彎性質試驗，其結果 MOE 由 61080 ~ 109010 kgf/cm²，MOR 則為 450 ~ 1062 kgf/cm²，將音速值與 MOE、MOR 進行回歸分析，其 R² 值分別為 0.34、0.27，F 值達極顯著狀態。以密度與 MOE、MOR 進行回歸分析，亦可發現其呈一正相關趨勢，R² 值分別為 0.44、0.39。當考慮音速值與密度值之關係，而以音速值動彈性模數（MOEdv）之形式與 MOE、MOR 進行回歸分析時，則可發現其 R² 值分別提高至 0.63、0.53。由此在評估試材品質時，可藉由音波之傳遞速度與其本身之密度來達成。
- (4) 本研究就全試材每間隔 30cm 區隔為一小段，分別進行橫向音速與 DMP 之檢測，其結果顯示超音波與 DMP 的檢測應用於古蹟材料之損壞上，有一定的可信度。

第五章 總結與建議

(1) 國內古蹟及歷史建築常使用木料性質之資料庫

1. 本研究建立國內古蹟及歷史建築常使用木料之基礎資料，如台灣扁柏、紅檜、台灣肖楠、台灣杉、鐵杉、福州杉、柳杉、樟樹、大葉楠及台灣櫟。

(2) 古蹟及歷史建築木料之非破壞檢測方法與程序

1. 國內古蹟及歷史建築木料之非破壞檢測方法有目視檢驗法、敲擊檢驗法、探針檢驗法、聽診器檢測法、射線照射檢測法、超音波檢測法、構件損壞評估法、阻抗圖波檢測法(Rinn Tech Resistograph 1410)、木材腐朽檢測法(Sibert Tech Wood Decay Analyzer)，各有其優點與缺點、以及適用性與侷限性。

2. 古蹟與歷史建築木料之損壞檢測，基本方法是目視與敲擊，定期的測定結果為認識異常之目的之超音波速診斷，更進一步集中重點之重要部位之監視法 Rosistograph（或 DMP 檢測）會較為適當。Rosistograph（或 DMP）進行檢查是局部的損傷會隨之發生，但內部之狀態能加以把握之有效的方法。

(3) 古蹟及歷史建築修復用新木料材質評估

1. 實生林杉木之 r_u 、 V_u 、 E_{DU} 、 E_{DT} 、MOE 及 MOR 值均各會大於萌蘖林杉木 1%、3%、8%、8%、8%及 8.1%，但經 T 值檢驗，只有 V_u 、 E_{DU} 及 E_{DT} 值在兩者之間有顯著性差異，其他均無顯著性差異。
2. 杉木的氣乾比重與 E_{DU} 之間的直線迴歸式有相關性，但與超音波速之間則無相關性存在。
3. 杉木超音波速與 E_{DU} 、 E_{DT} 、MOE 相互間，所得直線迴歸式均具有顯著的相關性，而與 MOR 之間則無相關性存在。
4. 杉木 E_{DU} 、 E_{DT} 、MOE 相互間，所得直線迴歸式均具有顯著的相關性。

5. 杉木 E_{DU} 、 E_{DT} 與 MOR 相互間，所得直線迴歸式，亦有顯著性存在，但其相關係數僅有 0.60 左右。
6. 天然林杉木與人工林杉木之密度差異不大，但是影響其力學性質甚大之平均年輪寬，是以天然林杉木小於人工林杉木，而天然林杉木抗彎性質也遠優於人工林杉木。所以未來修復古蹟與歷史建築時，對於木料之挑選應非常慎重，並訂定一套正確之木料規範。

(4) 古蹟及歷史建築大木構件損壞評估

1. 本研究以超音波儀檢測台北孔廟抽換舊木料內部健全處之縱向音速值均在 4763 ~ 5671 m/s，符合健全材音速值之範圍。目視判斷試材僅周遭腐朽（近外側邊材），材料內部仍保有相當完整之斷面。結果顯示，國內古蹟修復抽換大多僅憑木料外觀目視之判斷，材料內部仍保有相當完整之斷面應仍能承受外力，或當作其他部材再利用，因此古蹟抽換木料之標準應即時建立，方不會因修復抽換木料而減損古蹟之歷史價值與浪費資材。
2. 將全試材依每段 60 公分之長度裁斷為小試材後，再進行縱向音波傳遞速度之測定，發現每段試材之縱向音波傳遞速度與全試材之縱向音速值並無明顯差異，經 F 值檢測無顯著性差異。因此判斷可以縱向音速值來評估試材品質。
3. 將各分段試材進行音速值與抗彎性質試驗，其結果 MOE 由 61080 ~ 109010 kgf/cm²，MOR 則為 450 ~ 1062 kgf/cm²，將音速值與 MOE、MOR 進行回歸分析，其 R^2 值分別為 0.34、0.27，F 值達極顯著狀態。以密度與 MOE、MOR 進行回歸分析，亦可發現其呈一正相關趨勢， R^2 值分別為 0.44、0.39。當考慮音速值與密度值之關係，而以音速值動彈性模數 (MOE_{dv}) 之形式與 MOE、MOR 進行回歸分析時，則可發現其 R^2 值分別提高至 0.63、0.53。由此在評估試材品質時，可藉由音波之傳遞速度與其本身之密度來達成。

4. 本研究就全試材每間隔 30cm 區隔為一小段，分別進行橫向音速與 DMP 之檢測，其結果顯示超音波與 DMP 的檢測應用於古蹟材料之損壞上，有一定的可信度。

第六章 主要參考文獻

1. 王松永 (1984) 木材之動力學與音響學特性之研究 (I) 木材之音速影響因子之研究, 國立台灣大學農學院實驗林研究報告 150:1-23.
2. 王松永 (1986) 木材物理學, 國立編譯館: 213-232。
3. 王松永 (1998) 育林撫育技術對柳杉木材材質之影響, 生命科學簡訊 12 (6): 13-16。
4. 王松永, 林淑華 (1997) 不同栽植距離柳杉木材之動彈性模數及靜曲性質之影響因子探討, 中華林學季刊 30 (1): 3-13。
5. 沈學銘, 1994, '中國傳統建築腐蝕樑卯對木構架結構行為之探討', 國立中興大學土木工程研究所碩士論文, 台中。
6. 林振榮 (1992) 柳杉、杉木造林木之原木品等與製材率、製材品等與彎曲性質之研究, 碩士論文。
7. 林振榮、施能毅、王松永 (1992) 柳杉, 杉木造林木之製材品等與彎曲性質之相關研究。台大實驗林研報 6 (1): 71-101。
8. 林淑華 (1994) 台灣栽植柳杉之栽植距離對其原木、製材品等及製材彎曲強度性質影響, 碩士論文。
9. 洪朝聰 (1984) 台灣傳統建築修護程序與技術之研究, 私立淡江大學建築研究所碩士論文。
10. 施慶芳 (1986) 杉木之萌蘖特性與育林, 中華林學季刊 19 (1): 1-13。
11. 柯志裕 (1995) 栽植距離對柳杉實大樑靜曲及動彈性模數的影響, 台灣大學森林學研究所碩士論文。
12. 洪國榮、蔡育林, 1997, '台灣傳統木結構用材之鑑定', 〈林產工業, 第 16 卷, 第 4 期〉, pp.655 680, 中華民國林產事業協會。
13. 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。蔡明哲、徐明福 (1998) 超音波檢測技術應用於台灣古蹟大木構件新料擇用之初探 建築學報 26:45-55。
14. 莊世滋、王松永 1997 應力波時間差應用於材質評估之研究 (I)。

- 林產工業。16(4):681-696。
15. 陳弘旭 陳春杏 張嘉祥, 1996, '傳統寺廟大木作柱構材損壞評估', 〈建築學報, 第 18 期〉, pp.25 35, 中華民國建築學會。
 16. 陳欣欣、黃彥三 (2002) 栽植距離與季節對針葉樹造林木材質超音波非破壞評估之影響, 中華林學季刊 35(1): 85-90。
 17. 陳春杏 陳弘旭 張嘉祥, 1996, '傳統寺廟大木作 構材損壞評估', 〈建築學報, 第 18 期〉, pp.37 49, 中華民國建築學會。
 18. 曾偉宏, 王松永 (1984) 杉木造林木基本性質之研究, 國立台灣大學森林學研究所碩士論文: 91-94。
 19. 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。
 20. 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。
 21. 蔡如藩 編著, 1984, 〈木材力學性質〉, 徐氏基金會, 台北。
 22. 蔡明哲、徐明福 (1998) 超音波檢測技術應用於台灣古蹟大木構件損壞評估之探討。建築學報 27: 45-55。
 23. 田中俊成 (1988) 各種非破壞試驗 強度性能 推定 - 穿孔性害虫被害材 適用。木材工業 43 (2): 20-25。
 24. 永富之一、去田勝彥、番江谷薰、村瀨安夫 (1992) 乾燥過程 14 品種 打擊音 係數 測定。木材工業 47 (2): 70-73。
 25. 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章 (1992) 應力波 立木 材質測定 (第 1 報) 測定方法 應力波 傳播經路, 木材學會誌 38 (8): 739-746。
 26. 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章 (1992) 應力波 立木 材質測定 (第 2 報) 立木 適用, 木材學會誌 38 (8): 747-752。
 27. 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章 (1993) 應力波 立

- 木 材質測定 (第 3 報) 林分 立木材質 評價, 木材學會誌 39 (8) : 903-909。
28. 有田紀史雄, 1986, `超音波 利用 ~ 木柱内部腐朽檢知`, 〈木材工業, 第 41 卷, 第 8 期〉, pp.370-374。
 29. 則元京 (1982) 樂器用材 物性 (第一報) 響板用材 選別 。木材學會誌 28 (7) : 407-413。
 30. Breeze, J. E. and R. H. Nilberg, 1971, `Predicting by sonic measurements the strength of logs and poles having internal decay`, 〈Forest Products Journal, Vol. 21, No. 5〉, pp.39-43.
 31. Bucur, V. (1995) Acoustics of Wood. CRC press, Inc. p.177-196.
 32. Faust, T. D., R. H. Mcalister and S. J. Zarnoch (1990) Strength and stiffness properties of sweetgum and yellow-poplar structural lumber. Forest Products Journal 40 (10) : 58-64.
 33. Jayne, B. A., 1959, `Vibrational properties of wood as indices of quality`, 〈Forest Products Journal, Vol. 9, No. 11〉, pp.413-416.
 34. Mishiro, A. (1995) Ultrasonic Velocity in Wood and Its Moisture Content. Effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood. Mokuzai Gakkishi 41 (12) : 1086-1092.
 35. Mishiro, A. (1996) Effects of Grain and Ring Angles on Ultrasonic Velocity in Wood. Mokuzai Gakkishi 42 (2) : 211-215.
 36. Mishiro, A. (1996) Ultrasonic Velocity and Moisture Content in Wood II. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (1); Moisture content below the fiber saturation point. Mokuzai Gakkishi 42 (6) : 612-617.
 37. Mishiro, A. (1996) Ultrasonic Velocity and Moisture Content in Wood III. Ultrasonic velocity and average moisture content in wood during desorption (2); During desorption from a water-saturated condition. Mokuzai Gakkishi 42 (10) : 930-936.

38. Rinn, F., F.-H. Schweingruber and E. Schaer, 1996, 'Resistograph and X-ray density charts of wood. - Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species', *〈Holzforschung, Vol. 50〉*, pp.303-311.
39. Ross R. J., D. W. Green, K. A. McDonald and K. C. Schad. 1996 NDE of logs with longitudinal stress waves. NDT 1996 10th International symposium on Nondestructive testing of wood. P117-123.
40. Sandoz, J. L. (1993) Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Sci. Technol.* 27: 373-380.
41. Sandoz, J. L. and P. Lorin (1994) Standing tree quality assessments using ultrasound. First Europ. Symp. on nondestructive evaluation of wood. Sopron, Hungary: 493-502.
42. Sandoz, J. L. (1989) Grading of Construction Timber by Ultrasound. *Wood Sci. Technol.* 23 : 95-108.
43. Sandoz, J. L., 1996, 'Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications', *〈Proceedings of 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood〉*, pp.147-153, Lausanne, Switzerland.
44. Sasaki, Y., T. Iwata, K. Kuraya and K. Ando (1997) Acoustoelastic Effect of Wood I. Effect of compressive stress on the velocity of ultrasonic longitudinal waves parallel to the longitudinal direction of the wood. *Mokuzai Gakkishi* 43 (3) : 227-234.
45. Wang S.Y., Chen K. N. (1992) Effect of plantation spacings on tracheid lengths, annual-ring widths and percentages of latewood and heartwood of Taiwan-grown Japanese cedar, *Mokuzai Gakkishi* 38(7):645-656.
46. Wang S.Y., Chiu C. M. (1993) variation of the modulus of toughness and wind resistance of Taiwan-grown Japanese cedar originated by seed and vegetative reproduction, *Mokuzai Gakkishi* 38(7):645-656.
47. Wang S.Y., Chuang S. T. (1998) Feasibility of evaluating lumber and tree quality by using stress wave and ultrasonic wave method, proceeding of

the Fifth world Conferences on Timber Engineering,
Lausanne-Montreux-Switzerland, August, 17-20 1998.

48. Wang S.Y., Lin S. H. (1996) Effect of plantation spacings with quality of visually graded lumber and mechanical properties of Taiwan-growth Japanese cedar, *Mokuzai Gakkishi* 42(5):435-444.
49. Wilcox, W. W., 1988, 'Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity', *Forest products Journal*, Vol. 38, No. 5, pp.68-73.
50. Zhou, H. and I. Smith (1991) Factors influencing bending properties of white spruce lumber. *Wood and Fiber Science* 23 (4) : 483-500.

第七章 附件

第一節 期中審查意見與答覆

	審查意見	說 明
1	名詞統一？	有關名詞會參照建築與土木習用或相關CNS之標準名詞修改
2	古蹟木料損壞檢測判斷基準、工作手冊？	本研究期末報告會針對古蹟木料損壞檢測判斷基準、非破壞檢測流程提出研究結果。研究團隊亦願意協助建研所編撰古蹟木料檢測工作手冊。
3	古蹟木料安全係數之建立？	古蹟木料安全係數牽涉傳統木結構的設計，以及設計時構件容許應力的折減係數，非常重要與複雜，可建議下年度進行研究。

第二節 期末審查意見與答覆

GPN : @@@@

ISBN :

非破壞性檢測法應用於古蹟及歷史建築大木作損壞之研究

內政部建築研究所

92

非破壞性檢測法應用於古蹟及歷史建築大木作損壞之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 27362389

地址：台北市敦化南路二段 333 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

出版年月： 年 月

版（刷）次：第 版

工本費：

GPN：@@@@

ISBN：