

研究報告

應用非破壞檢測技術評估杉木集成元之抗彎性質

李佳如¹ 楊德新²

【摘要】本研究利用目視分等法、超音波法、打音法及抗彎試驗法評估國產 2 by 6 與 2 by 8 之杉木集成元之動彈性模數與抗彎彈性模數之相關性。試驗結果指出，依 CNS 14630 分等法，抗彎彈性模數方面有一級材 > 二級材 > 三級材之趨勢，但經變異數分析則顯示僅一級材與三級材有差異；另依 CNS 14631 分等法下，2 by 6 集成元之抗彎彈性模數值依序為特級材 > 一級材 > 三級材 > 二級材；2 by 8 集成元之抗彎彈性模數值依序為特級材 > 二級材 > 三級材 > 一級材，但各等級間均無顯著差異，因此目視分等等級材其強度上並不如機械分等材精確。在動彈性模數方面，超音波動彈性模數 (DMOEV) 與打音動彈性模數 (DMOEF) 均較抗彎彈性模數 (MOE) 為大，而以打音動彈性模數最為接近，比較其關係式雖彼此均有正相關存在，但以打音動彈性模數與抗彎彈性模數之關係性最佳 ($R^2 = 0.82-0.90$)，因此以打音法所得之動彈性模數來作為評估杉木集成元之抗彎彈性模數較為適當。

【關鍵字】非破壞評估、集成元、目視分等法、超音波法、打音法

Research paper

Evaluation of Bending Properties of China fir Laminae Using Nondestructive Testing

Lee Chia-Ju¹, Yang Te-Hsin²

【Abstract】The purpose of this study was to investigate the dynamic and static bending properties of 2- by 6-inch and 2- by 8-inch China fir laminae using nondestructive techniques, including visual grade method, ultrasonic wave method, tap tone method and static bending test. In addition, the DMOEV which was dynamic MOE from ultrasonic wave method, DMOEF which was dynamic MOE from tap tone method and MOE which was from static bending test were calculated, respectively. The results indicated that the MOE values of 2- by 6-inch and 2- by 8-inch laminae have the tendency of Class1 > Class2 > Class3 according to CNS14630, the visual grading method. In addition, there was a significant difference between Class1 and Class 3. However, there was no significant difference among the MOE values of the four laminae grades by CNS 14631, the visual grading method. Most

1. 國立台灣大學實驗林管理處，研究助理

Research Assistant, The Experimental Forest, National Taiwan University.

2. 國立中興大學森林學系，助理教授，通訊作者，402 台中市南區國光路 250 號

Assistant Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding author. 250, Kuo Kuang Road, Taichung 402, Taiwan. E-mail : tehsinyang@dragon.nchu.edu.tw

of the criteria used in the visual grading of the lumber were not closely correlated with specific properties, therefore, visual grading was not as precise as machine stress rated. The results also showed that the dynamic MOE of lumber was greater than that the static MOE of lumber, however, the values of DMOEf were very close to those of MOE. There were high correlations among the DMOEv, DMOEf and MOE, especially between the DMOEf and MOE ($R^2 = 0.82-0.90$). Hence, the tap tone method was a better approach to determine the static MOE of lumbars.

Key words: Nondestructive evaluation, Lamina, Visual grade method, Ultrasonic wave method, Tap tone method

一、前言

所謂非破壞性檢測 (Nondestructive testing, NDT) 乃是以不破壞受檢物之完整性與最終使用性之前提下，進而檢測受檢物之物理特性、機械特性以及品質狀況之方法。Ross and Pellerin (1991) 指出所謂非破壞檢測乃是以不損害材料既有用途之前提下，所進行評估材料本身性質或內部構造之方法，此方法可用以檢測材料內部瑕疵與外在缺點、量測厚度、決定材料之結構組成及其性質等。

非破壞檢測技術最早乃應用於金屬、塑膠、水泥等均質材料領域，而非木材此類生物性材料，Jayne (1959) 首先將非破壞檢測概念應用於木質材料，並指出可藉由非破壞檢測技術量測木材能量貯存與散失之性質，而這些性質與決定這些材料之抗彎性質乃是由同一機制所控制，因此這些性質與抗彎性質間之數學關係可用統計迴歸之方式分析加以建立。以微觀點視之，能量的貯存會受到細胞和結構排列組成之影響，而這些正是影響抗彎彈性模數及強度之因子，此性質可由振動頻率或音波傳遞速度加以觀測，相反的，能量的散失是由內部摩擦所控制，通常可由觀測木材或其他材料之自然振動衰減率或音波衰減而得知。Galligan (1964) 將非破壞檢測分類為以下四種：1. 目視分等評估：針對顏色、缺點等進行；2. 物理測試：如誘電率、振動特性、音波傳遞、音射、X-ray 等；3. 化學成分分析：組成份、防腐處理或耐燃處理等；4. 機械性質測定：抗彎、抗壓、探針、鑽孔等。

有賴於非破壞檢測技術之興起，傳統上以破壞方式而準確求得材料強度性質之試驗得以非破壞試驗代替，除便利外，亦有節省材料損失之經濟優點。針對構成集成材之集成元材料強度之區分上，目前可以「目視等級區分法」與「機械等級區分法」二種方法進行。

目視等級區分法係屬一種較為簡單且方便之評估方法，其利用在外觀上能確認的參數(例如節、纖維走向之傾斜、腐朽等)，進行等級之區分；而機械等級區分法則是利用視覺上不能探知，但和強度性能具有高度相關之因子(如彈性模數、硬度等)，對木材加以分等，特別是以彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE) 為指標者，可做較高精度的區分，同時亦因木材之強度性質多與彈性模數成線性正相關，因此常藉彈性模數之測定而據以推定其強度性質。

彈性模數之測定分為靜態法與動態法二者，所謂靜態法乃係於彈性限度內施以靜載重，由其載重與撓度關係推算其彈性模數 (Sandoz, 1993)，而動態法則藉由振動法、超音波法、打音法與應力波法等計算之 (Sandoz, 1989; Ross and Pellerin, 1988, 1991; Green and McDonald, 1993; Rajesjwar *et al.*, 1997; Wagner *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2008)。

因此，本研究以現行中華民國國家標準中之 CNS 14630 號「針葉樹結構用製材」及 CNS 14631 號「框組壁工法結構用製材」標準中之目視分等進行等級區分，探討目視分等後各等級材間之差異，再進一步以超音波法與打音法進行非破壞性評估，希冀能建立一良好之關係

式，以作為將來評估抗彎彈性模數之依據。

二、試驗材料與方法

(一) 試驗材料

本試驗選用新竹正昌製材有限公司所產 20 年生之人工林杉木 (China fir, *Cunninghamia lanceolata*)，並經製材為標稱尺寸 2 by 6 與 2 by 8 兩種規格之杉木集成元，其長、寬、厚之實際尺寸與數量分別為 180.0 cm × 14.0 cm × 3.8 cm 共 140 支以及 180.0 cm × 19.0 cm × 3.8 cm 共 138 支。

(二) 試驗方法

1. 目視分等法

目視分等係依中華民國國家標準 CNS 14630 針葉樹結構用製材標準 (2002) (表 1) 及 CNS 14631 框組壁工法結構用製材標準 (2002) (表 2) 進行。

2. 超音波法

使用超音波儀 (CBS&CBT, SYLVATEST, 16KHz) 測定其縱向超音波速，其利用一發聲器 (Pulse generator) 及一接受器 (Receiver) 直接貼附於試片兩端，直接測定音波傳遞過試片所需之時間，再依次式計算出其速度

$$V_u = \frac{L}{t} \quad (1)$$

V_u 為縱向超音波速 (m/s)， L 為試片長 (m)， t 為時間 (sec)。

而一般固體材料之音速 (V_u) 與其彈性模數 (DMOEV)，密度 (ρ) 之間有次式之關係：

$$DMOEV = V_u^2 \times \rho \quad (2)$$

3. 打音法

使用打音測定儀 (FAKOPP Enterprise, Portable Lumber Grader)，以鋪有泡棉之木塊支持試片中央位置，以硬質橡膠槌敲擊試材之一端，打音由置於試材另一端之麥克風檢出，並

表 1. 中華民國國家標準 CNS 14630 針葉樹結構用製材分等標準

Table 1. CNS 14630 grading rules of structural coniferous sawn lumber

Item		Standard		
		Class 1	Class 2	Class 3
Knot		Diameter ratio ≤ 20 %	Diameter ratio ≤ 40 %	Diameter ratio ≤ 60 %
		The diameter ratio of knot cluster shall be 1.5 times the above standards		
Wane		≤ 10 %	≤ 20 %	≤ 320 %
Through split	End	≤ the long side length	≤ 1.5 times the long side length	≤ 2.0 times the long side length
	Face	None	≤ 1/6 the lumber length	≤ 1/3 the lumber length
Shake		≤ 1/2 of the short side length	≤ 1/2 of the short side length	-
Slope of grain		≤ 1:12	≤ 1:8	≤ 1:6
Average annual rings		≤ 6 mm	≤ 8 mm	≤ 10 mm
Decay		None	Slight	Not obvious
Crook		Slight	Slight	Not obvious
Warp		Slight	Not obvious	No hindrance in use

表 2. 中華民國國家標準 CNS 14631 框組壁工法結構用製材分等標準
Table 2. CNS 14631 grading rules of structural sawn lumber used in platform construction

Item	Grade		
	Select	Class 1	Class 2
Quality	Max. dia of knot	\leq the value in Table 2a	\leq the value in Table 2a
	Width related face	The sum of knot dia in any 15-cm-long face \leq 2times the value in Table 2a	The sum of knot dia in any 15-cm-long face \leq 2times the value in Table 2a
	Knot cluster	\leq 1 for 120-cm-long face	\leq 1 for 90-cm-long face
	No. of holes	\leq 1 for 120-cm-long face	\leq 1 for 60-cm-long face
	Thickness related face	The converted max. dia. on the edge section of width related of face \leq the value of Table 2a	The converted max. dia. on the edge section of width related of face \leq the value of Table 2a
		The converted max. dia. on the edge section of width related of face \leq the value of Table 2a	The converted max. dia. on the edge section of width related of face \leq the value of Table 2a

Table 2a Type A platform lumber

Class	Type	Class 1			Class 2			Class 3		
		Sound knot	Holes		Sound knot	Holes		Sound knot	Holes	
		Edge	Center	Edge	Center	Edge	Center	Edge	Center	Center
206	29	48	57	38	57	48	73	70	95	51
208	38	57	70	51	70	64	89	89	114	64

Unit: mm

輸入 FFT (Fourier transform) 頻譜分析儀，將瞬間發生之打音波形分解成頻譜，便可精密測量出其自然頻率，並由次式可計算出其音速與動彈性模數：

$$Vf = 2fr \times L \quad (3)$$

$$DMOEF = 4fr^2 \times L^2 \times \rho \quad (4)$$

Vf 為縱向音速 (m/s)，L 為試片長 (m)，fr 為自然頻率 (Hz)，ρ 為木材密度 (kg/m³)

4. 抗彎試驗

將 2 by 6 與 2 by 8 之杉木集成元試片進行三分等載重抗彎試驗，在比例限度內求其抗彎彈性模數 (MOE)

$$MOE = \frac{\Delta P(l-s)[2l^2+2ls-s^2]}{8\Delta\delta bh^3} \quad (5)$$

ΔP 為比例限度領域上限載重與下限載重之差 (kgf)，Δδ 為與 ΔP 相對應跨距中央之撓度差 (cm)，l 為跨距 (cm)，s 為兩載重點距離 (cm)，b 為試片寬度 (cm)，h 為試片厚度 (cm)。

三、結果與討論

(一) 杉木集成元之基本性質

本次選用之 20 年生杉木集成元基本性質如表 3 所示，2 by 6 集成元之密度為 0.31-0.52 (g/cm³)，平均為 0.41 (g/cm³)，超音波速 (Vu) 為 3985-5815 (m/s)，平均值為 5149 (m/s)，打音音速 (Vf) 為 3298-5609 (m/s)，平均值為 4735 (m/s)，超音波動彈性模數 (DMOEv) 為 66169-165485 (kgf/cm²)，平均值為 111045 (kgf/cm²)，打音動彈性模數 (DMOEF) 為 48645-151350 (kgf/cm²)，平均值為 94218 (kgf/cm²)，抗彎彈性模數 (MOE) 為 48278-147225 (kgf/cm²)，平均值為 91683 (kgf/cm²)。MOE 值之分佈如圖 1 所示，可看出大部分集中於 70000-120000 (kgf/cm²) 範圍內，累計該範圍內之彈性模數佔整體之 92.86 %。比較各動彈性模數與抗彎彈性模數發現，DMOEv 值分別較 DMOEF 值、MOE 值大約 17.9 % 與 21.1 %，而 DMOEF 值則較 MOE 值大約 2.8 %。

表 3. 杉木集成元之基本性質

Table 3. Fundamental properties of China fir laminae

Lumber size	Item	Min	Max	Mean
	Sample numbers		140	
2- by 6- inch China fir laminae	density (g/cm ³)	0.31	0.52	0.41 (9)
	Vu (m/s)	3985	5815	5149 (6)
	Vf (m/s)	3298	5609	4735 (9)
	DMOEv (kgf/cm ²)	66169	165485	111045 (14)
	DMOEF (kgf/cm ²)	48645	151350	94218 (18)
	MOE (kgf/cm ²)	48278	147225	91683 (18)
	Sample numbers		138	
2- by 8- inch China fir laminae	density (g/cm ³)	0.33	0.47	0.40 (7)
	Vu (m/s)	4673	5789	5159 (5)
	Vf (m/s)	4241	5494	4847 (6)
	DMOEv (kgf/cm ²)	78692	145555	108770 (13)
	DMOEF (kgf/cm ²)	68486	133947	95939 (13)
	MOE (kgf/cm ²)	67284	133948	93566 (14)

Values in parentheses represent the coefficient of variation.

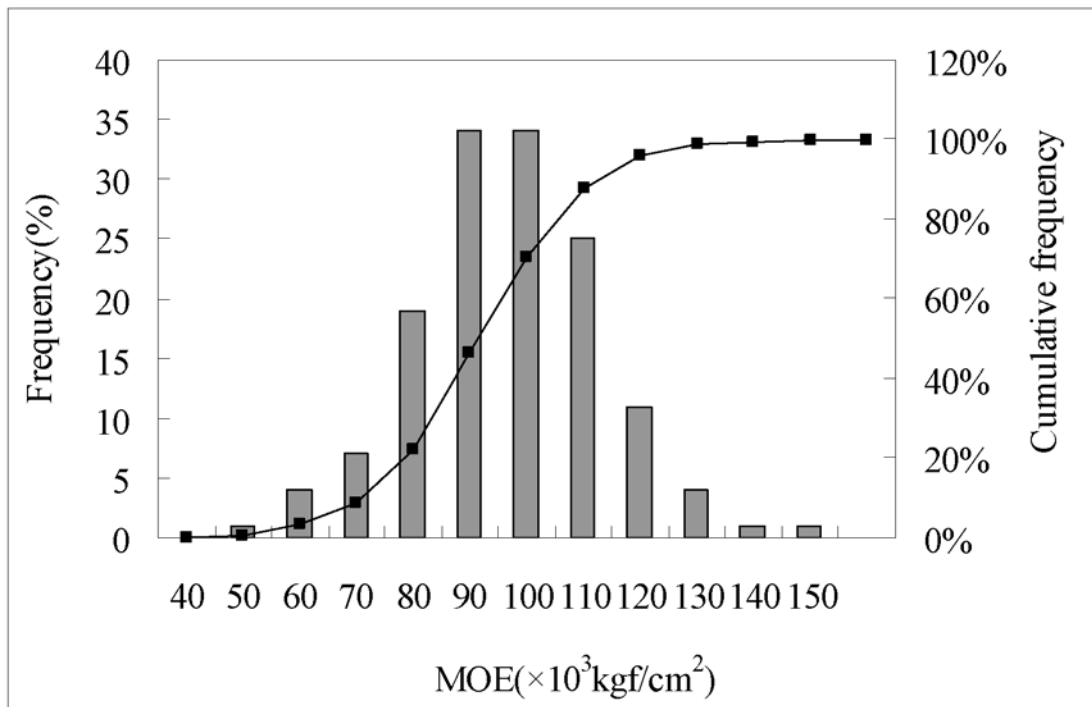


圖 1. 2 by 6 杉木集成元之彈性模數分佈圖

Fig. 1. The MOE frequency distribution of 2- by 6-inch China fir laminae

在 2 by 8 集成元方面，其密度為 0.33-0.47 (g/cm^3)，平均值為 0.40 (g/cm^3)，超音波速 (Vu) 為 4673-5789 (m/s)，平均值為 5159 (m/s)，打音音速 (Vf) 為 4241-5494 (m/s)，平均值為 4847 (m/s)，超音波動彈性模數 (DMOEv) 為 78692-145555 (kgf/cm^2)，平均值為 108770 (kgf/cm^2)，打音動彈性模數 (DMOEf) 為 68486-133947 (kgf/cm^2)，平均值為 95939 (kgf/cm^2)，抗彎彈性模數 (MOE) 為 67284-133948 (kgf/cm^2)，平均值為 93566 (kgf/cm^2)。MOE 值之分佈如圖 2 所示，大部分集中於 80000-120000 (kgf/cm^2) 範圍內，累計該範圍內之彈性模數佔整體之 94.93 %。比較各動彈性模數與抗彎彈性模數之關係發現，DMOEv 值分別較 DMOEf 值、MOE 值大約 13.4 % 與 16.2 %，而 DMOEf 值則較 MOE 值大約 2.5 %。

就各彈性模數之比較，可以發現有 $\text{DMOEv} > \text{DMOEf} > \text{MOE}$ 之趨勢，筆者等

(Wang *et al.*, 2008) 以超音波法、振動法評估國產柳杉、台灣杉與進口花旗松、南方松 2 by 4 製品之抗彎彈性模數亦發現有超音波動彈性模數 $>$ 橫向振動彈性模數 $>$ 抗彎彈性模數之趨勢，其中，超音波動彈性模數平均約較抗彎彈性模數大約 7.1-16.1 %。此結果亦與 Haines *et al.* (1996) 所得試驗結果相似，其以縱向超音波法與振動法評估雲杉與冷杉之彈性模數發現，縱向超音波動彈性模數大於抗彎彈性模數約 17-22 %。Wang *et al.* (2005) 以超音波法評估立木材質時亦指出 DMOEv 約較 MOE 大約 9.5-14 %。對於動彈性模數大於抗彎彈性模數之原因可能有如抗彎試驗時含有扭轉變形、剪力成分等致使撓曲增大，又撓度之測定包含受力點之局部壓潰凹陷變形，以及荷重時間較長，多少有潛變產生等因素造成，而動態法所測得之動彈性模數因作用力週期短，試材本身僅受到短暫衝擊，幾乎沒有潛變作用現象發生

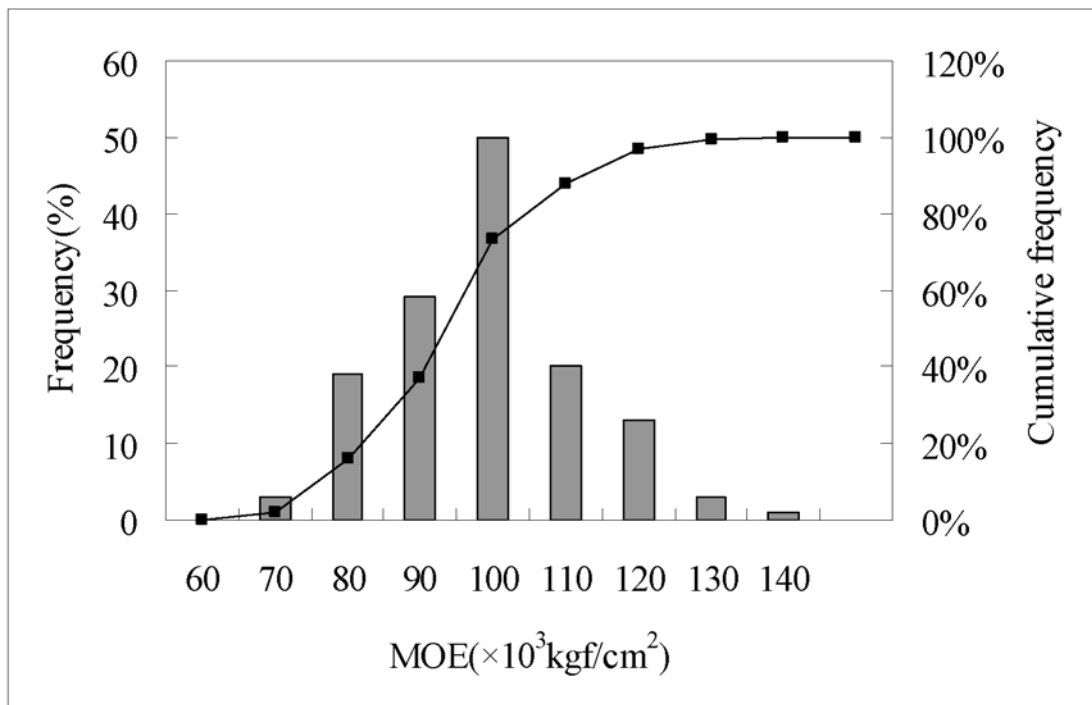


圖 2. 2 by 8 杉木集成元之彈性模數分佈圖

Fig. 2. The MOE frequency distribution of 2- by 8-inch China fir laminae

(吳順昭等, 1974, Halabe *et al.*, 1997)。蔡如藩 (1985) 亦指出造成動彈性模數較抗彎彈性模數大之原因可能係抗彎試驗時, 木材承受荷重時間較長, 而發生塑性流動、塑性變形、彈性遲滯、彈性餘效等因素影響所致。

(二) 應用目視分等法評估集成元之性質

目視分等乃係一簡單而方便之非破壞性評估方法, 本研究以 CNS 14630 (2002) 針葉樹結構用製材分等與 CNS 14631 (2002) 框組壁工法結構用製材分等標準來進行集成元之分等, 其主要依據為節於試材上所存在之尺寸, 而此二標準之差異在於對節之判定, CNS 14630 (2002) 以節徑比 (最大節直徑對於其所存在材面寬面之百分比) 作為分等之依據, 而 CNS 14631 (2002) 則以寬面與窄面之最大節作為分等之準則。

以 CNS 14630 (2002) 分等杉木集成元, 其各等級材之頻率分佈如圖 3 所示。2 by 6 之

杉木集成元, 一級材為 12.1 %、二級材為 43.6 %、三級材 35.0 %、等外材為 9.3 %; 2 by 8 之杉木集成元, 一級材為 29.0 %、二級材為 39.1 %、三級材 15.9 %、等外材為 15.9 %。

分等結果與 2 by 6 各等級集成元間相關性方面, 經變異數分析 (Analysis of variance, ANOVA) 結果如表 4 所示, 發現在密度、超音波速以及打音音速方面, 各等級集成元間均無顯著差異, 在 DMOEv 方面, 各等級是等外材 > 一級材 > 二級材 > 三級材, 其中, 三級材與等外材有顯著差異; DMOEf 方面, 各等級是一級材 > 等外材 > 二級材 > 三級材, 其中, 一級材與三級材有顯著差異; MOE 方面亦與 DMOEf 同。

再比較分等結果與 2 by 8 各等級集成元間相關性方面, 經 ANOVA 分析結果發現 (表 4), 在密度、超音波速與 DMOEv, 各等級集成元間無顯著差異, 在打音音速方面, 各等級是一

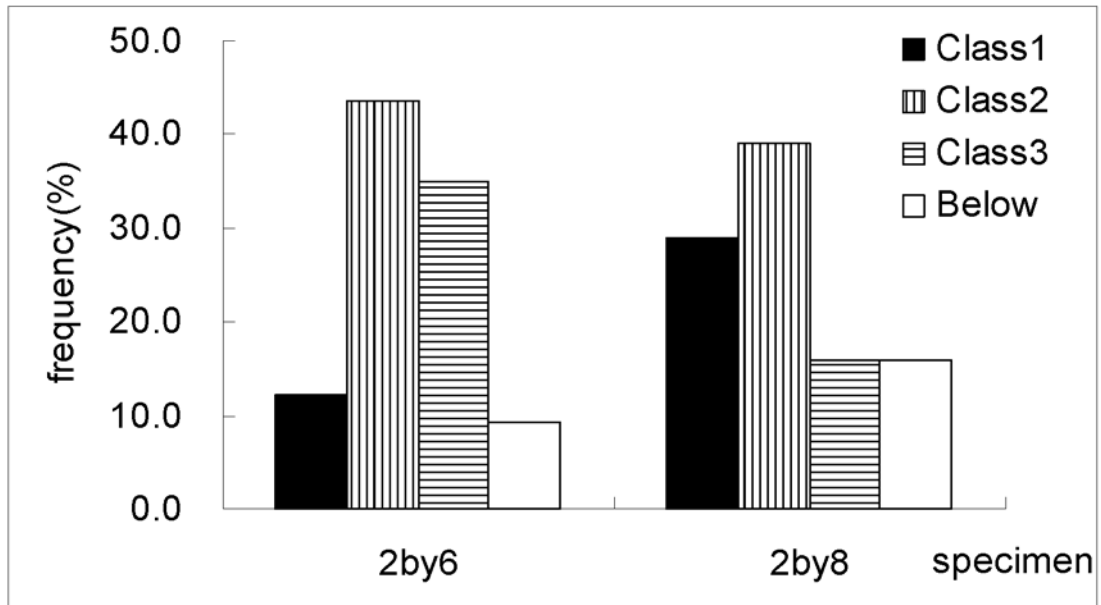


圖 3.依 CNS 14630 分等所得各等級材之頻率分佈圖

Fig. 3. Distribution frequency of China fir by CNS 14630

表 4. CNS14630 目視分等結果

Table 4. Analysis of ANOVA test for various laminae visual graded by CNS 14630

lumber size	Lumber grades	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
	Sample numbers	17	61	49	13	140
2- by 6- inch China fir laminae	density (g/cm ³)	0.41 ^a (10)	0.41 ^a (8)	0.40 ^a (9)	0.42 ^a (7)	0.41 (9)
	Vu (m/s)	5232 ^a (9)	5109 ^a (6)	5129 ^a (6)	5296 ^a (4)	5149 (6)
	Vf (m/s)	4932 ^a (11)	4727 ^a (8)	4641 ^a (9)	4871 ^a (7)	4735 (9)
	DMOEv (kgf/cm ²)	114981 ^{ab} (16)	110405 ^{ab} (14)	107907 ^b (13)	120726 ^a (9)	111045 (14)
	DMOEf (kgf/cm ²)	102311 ^a (19)	94798 ^{ab} (18)	88557 ^b (17)	102250 ^a (13)	94218 (18)
	MOE (kgf/cm ²)	102693 ^a (18)	91772 ^{ab} (16)	85697 ^b (19)	99435 ^a (12)	91683 (18)
		Sample numbers	40	54	22	22
2- by 8- inch China fir laminae	density (g/cm ³)	0.40 ^a (5)	0.39 ^a (9)	0.40 ^a (7)	0.40 ^a (6)	0.40 (7)
	Vu (m/s)	5217 ^a (6)	5110 ^a (4)	5128 ^a (5)	5208 ^a (4)	5159 (5)
	Vf (m/s)	4988 ^a (6)	4847 ^a (4)	4730 ^a (7)	4705 ^b (5)	4847 (6)
	DMOEv (kgf/cm ²)	113105 ^a (14)	104715 ^a (13)	108300 ^a (11)	111311 ^a (11)	108770 (13)
	DMOEf (kgf/cm ²)	103201 ^a (13)	94193 ^b (13)	92222 ^b (13)	90734 ^b (10)	95939 (13)
	MOE (kgf/cm ²)	101298 ^a (14)	92149 ^b (12)	90554 ^b (13)	85998 ^b (12)	93566 (14)

Values in parentheses represent the coefficient of variation.

a and b show significant differences at the 0.05 level by the ANOVA test.

級材>二級材>三級材>等外材，等級材間無顯著差異，DMOEF 方面，各等級是一級材>二級材>三級材>等外材，其中，一級材與其他各等級材有顯著差異，MOE 方面亦與 DMOEF 同。

另以 CNS 14631 分等杉木集成元，其各等級材之頻率分佈如圖 4 所示。2 by 6 之杉木集成元，特級材為 40.0 %，一級材為 15.7 %、二級材為 23.6 %、三級材 14.3 %、等外材為 6.4 %；2 by 8 之杉木集成元，特級材為 55.1 %，一級材為 7.2 %、二級材為 5.8 %、三級材 13.0 %、等外材為 18.8 %。

分等結果與 2 by 6 各等級集成元間相關性方面，經 ANOVA 分析結果發現 (表 5)，在密度、超音波速以及打音音速上，各等級集成元間無顯著差異，在 DMOEV 方面，各等級是等外材>三級材>特級材>一級材>二級材，其中，等級材間無顯著差異；DMOEF 方面，各等級是等外材>特級材>一級材>三級材>二級材，等級材間亦無顯著差異；MOE 方面與 DMOEF 同。

最後以 ANOVA 分析比較分等結果與 2 by 8 各等級集成元間相關性方面發現 (表 5)，不論密度、超音波速、打音音速、DMOEV、DMOEF 乃至 MOE，各等級間均無顯著差異，亦即以 CNS 14631 分等法分等杉木 2 by 8 集成元之結果，無法分別各等級之差異。

(三) 應用非破壞試驗法評估集成元之性質

1. 木材密度與抗彎彈性模數之相關性

木材密度為其強度指標之一，Markwart and Wilson (1935) 曾針對含水率為 12 % 之無缺點小試材，訂出 MOR (Modulus of rupture)、MOE 與密度之相關式，並指出密度為影響試材強度之重要因子。但在本研究中發現密度與 2 by 6 與 2 by 8 杉木集成元抗彎彈性模數之相關性相當低 ($R^2 = 0.05-0.15$)，因此以密度來作為預測大尺寸集成元之彈性性質並不妥當，此係無缺點小試材不似實大梁可能受節的尺寸、形態、大小、位置、纖維走向傾斜與年輪寬等

影響，因此能與木材彈性模數建立一良好關係式，但實大梁則否 (Courchene *et al.*, 1998; Xu, 2002)。以節為例，若節的位置出現在引張側之寬面上，將對強度造成重大影響；纖維走向傾斜部分，若為 1/15，將造成抗彎強度減少 24 %，若為 1/6，則造成抗彎強度 60 % 的減低 (ASTM D-245, 1999)，Burdzik and Nkwera (2002) 亦曾指出僅以密度作為單一預測實大梁木材強度之因子並不恰當。

2. 超音波法與抗彎彈性模數之相關性

圖 5 與圖 6 分別為超音波速 (Vu)、超音波動彈性模數 (DMOEV) 與抗彎彈性模數 (MOE) 之關係圖，可以發現當直接以超音波速評估 2 by 6 與 2 by 8 杉木集成元 MOE 時，其 R^2 值分別為 0.54 與 0.40，而以 DMOEV 預測 2 by 6 與 2 by 8 杉木集成元 MOE 時，其 R^2 值分別提升為 0.65 與 0.50，此可能係影響抗彎試驗之主要因子，包含木梁形狀、木理傾斜角、含水率、溫度、節與荷重速度等因素，這些複雜因子未能藉由超音波速全部反映出來所致。以往研究中，Ilic (2001) 曾就縱向動彈性模數、橫向動彈性模數與抗彎彈性模數進行比較，指出縱向音速動彈性模數與抗彎彈性模數成一顯著正相關關係，其 r 值達 0.95，而縱向音速與抗彎彈性模數間亦成一顯著正相關， r 值為 0.78，稍低於動彈性模數與抗彎彈性模數之關係。Wang *et al.* (2005) 就超音波法評估台灣杉彈性模數時指出，超音波速與抗彎彈性模數之 r 值為 0.763，而超音波動彈性模數與抗彎彈性模數之 r 值為 0.815。

3. 打音法與抗彎彈性模數之相關性

圖 7 與圖 8 分別為打音音速、打音動彈性模數與抗彎彈性模數 (MOE) 之關係圖，可以發現當直接以打音音速評估 2 by 6 與 2 by 8 杉木集成元 MOE 時，其 R^2 值分別為 0.68 與 0.71，考慮密度之影響，而以 DMOEF 預測 2 by 6 與 2 by 8 杉木集成元 MOE 時，其 R^2 值分別提升為 0.82 與 0.90，其相關性較超音波法更佳，同時由於打音法所測得之 DMOEF 較超音

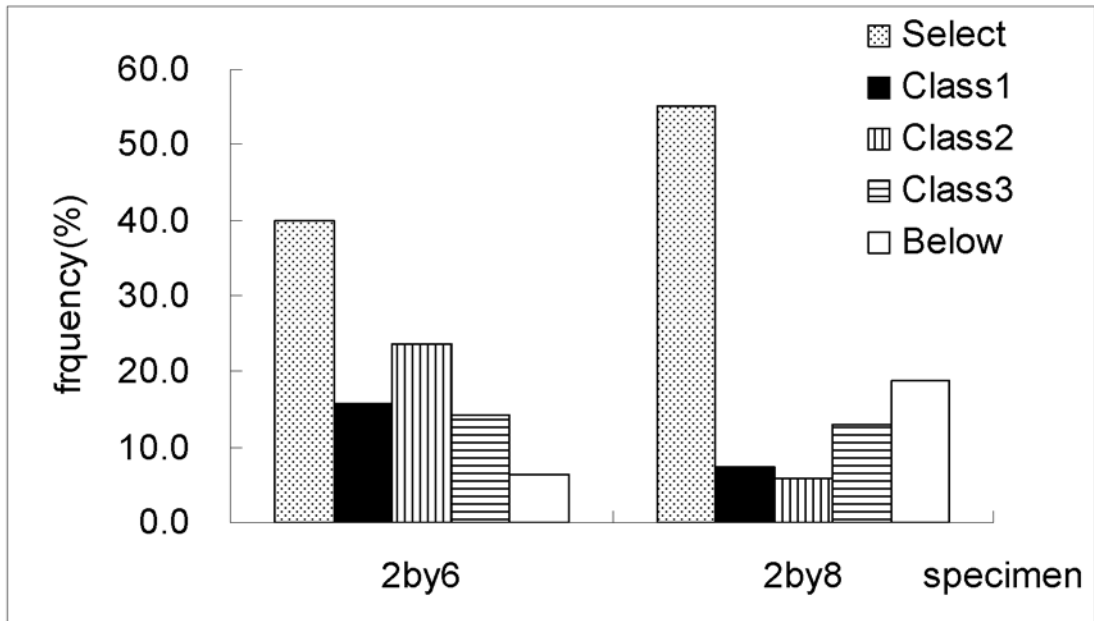


圖 4.依 CNS 14631 分等所得各等級材之頻率分佈圖

Fig. 4. Distribution frequency of China fir by CNS 14631

表 5. CNS14631 目視分等結果

Table 5. Analysis of ANOVA test for various laminae visual graded by CNS 14631

lumber size	Lumber grades	Select	Class 1	Class 2	Class 3	Below	Non-grade
	Sample numbers	56	22	33	20	9	140
2- by 6- inch China fir laminae	density (g/cm ³)	0.41 ^a (10)	0.41 ^a (6)	0.40 ^a (9)	0.41 ^a (7)	0.43 ^a (7)	0.41 (9)
	Vu (m/s)	5149 ^a (7)	5103 ^a (5)	5107 ^a (6)	5213 ^a (7)	5264 ^a (4)	5149 (6)
	Vf (m/s)	4796 ^a (10)	4708 ^a (6)	4663 ^a (8)	4660 ^a (9)	4852 ^a (8)	4735 (9)
	DMOEv (kgf/cm ²)	112082 ^{ab} (16)	109673 ^{ab} (10)	105740 ^b (10)	113804 ^{ab} (15)	121265 ^a (10)	111045 (14)
	DMOEf (kgf/cm ²)	97541 ^{ab} (20)	93621 ^{ab} (14)	88333 ^b (15)	91250 ^{ab} (18)	103171 ^a (15)	94218 (18)
	MOE (kgf/cm ²)	94802 ^a (18)	92499 ^a (15)	85724 ^a (16)	88562 ^a (21)	99071 ^a (14)	91683 (18)
	Sample numbers	76	10	8	18	26	138
2- by 8- inch China fir laminae	density (g/cm ³)	0.40 ^a (7)	0.39 ^a (10)	0.39 ^a (6)	0.40 ^a (7)	0.40 ^a (6)	0.40 (7)
	Vu (m/s)	5164 ^a (5)	5067 ^a (3)	5180 ^a (2)	5150 ^a (5)	5180 ^a (4)	5159 (5)
	Vf (m/s)	4933 ^a (6)	4778 ^a (3)	4831 ^a (1)	4783 ^a (6)	4672 ^a (5)	4847 (6)
	DMOEv (kgf/cm ²)	109211 ^a (15)	102963 ^a (10)	106144 ^a (9)	109122 ^a (11)	110279 ^a (11)	108770 (13)
	DMOEf (kgf/cm ²)	99498 ^a (14)	91528 ^a (9)	92174 ^a (7)	94106 ^a (11)	89659 ^a (12)	95939 (13)
	MOE (kgf/cm ²)	97520 ^a (14)	88105 ^a (10)	91924 ^a (8)	91867 ^a (12)	85789 ^a (12)	93566 (14)

Values in parentheses represent the coefficient of variation.

a and b show significant differences at the 0.05 level by the tukey test of ANOVA.

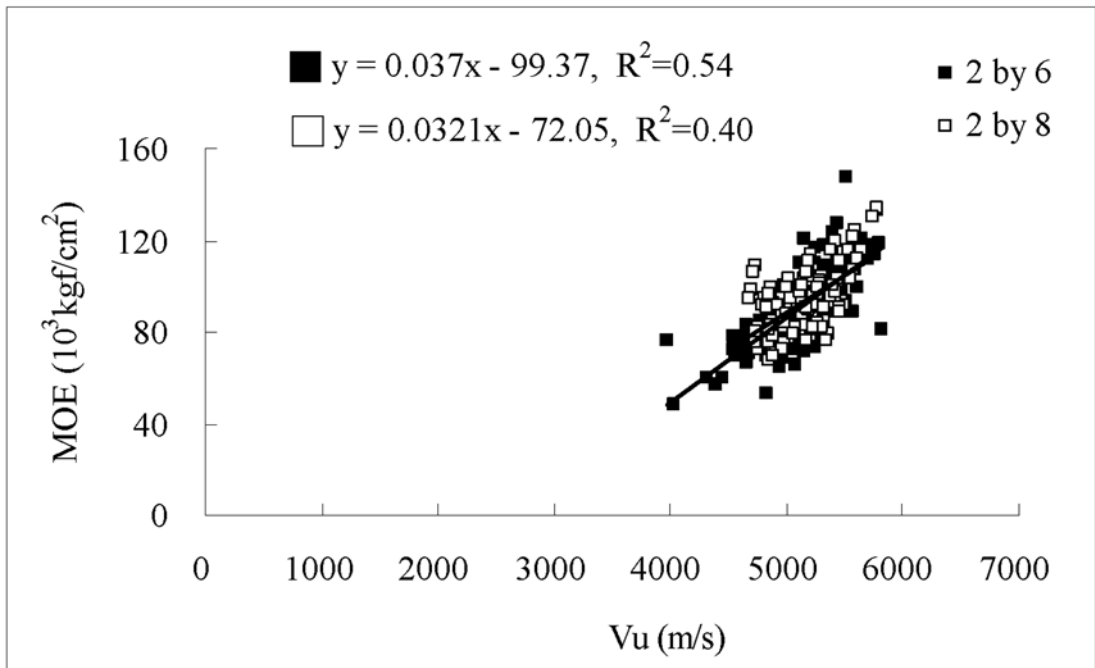


圖 5. 超音波速與抗彎彈性模數之關係

Fig. 5. Relationship between Vu and MOE.

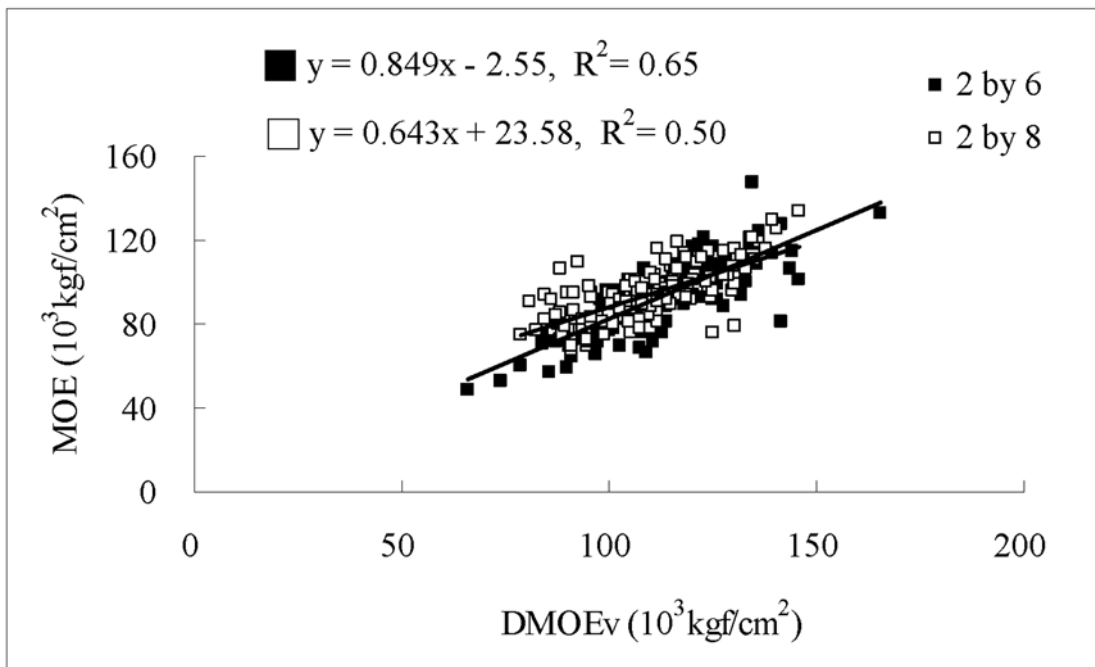


圖 6. 超音波動彈性模數與抗彎彈性模數之關係

Fig. 6. Relationship between DMOEv and MOE.

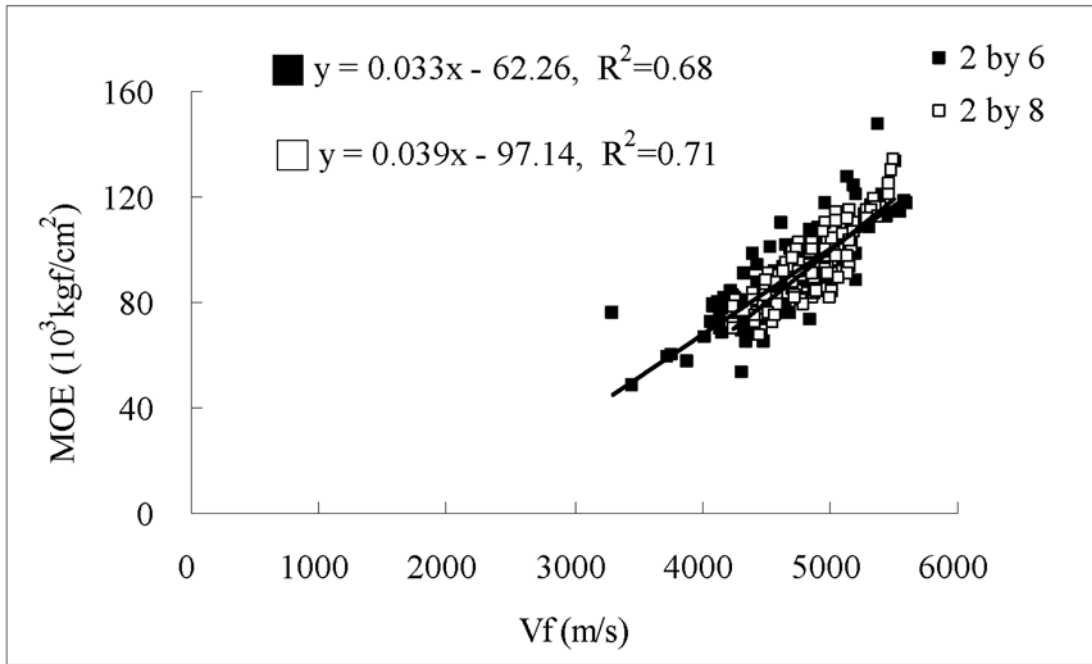


圖 7. 打音音速與抗彎彈性模數之關係

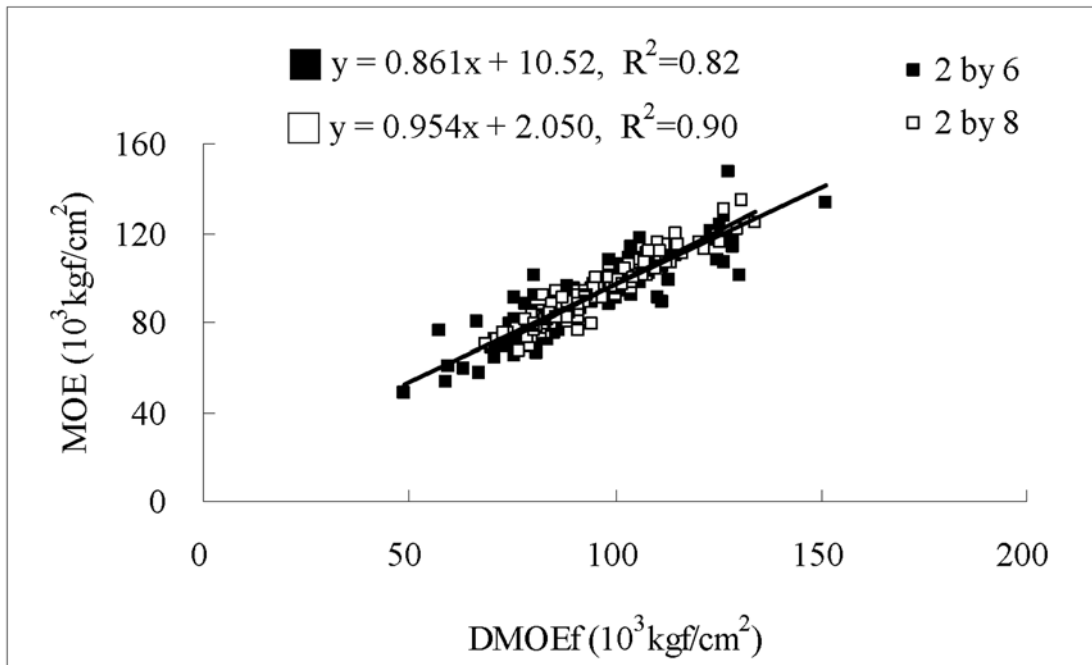
Fig. 7. Relationship between V_f and MOE.

圖 8. 打音動彈性模數與抗彎彈性模數之關係

Fig. 8. Relationship between $DMOE_f$ and MOE.

波法所得之 $DMOEv$ 更接近 MOE ，因此，打音法來進行杉木集成元之評估將比超音波法來得準確。黃彥三等 (1990) 曾就打音頻譜分析應用於評估材質之可行性進行探討，其指出利用 FFT 頻譜分析儀可以迅速而準確的量測材質之動彈性模數，且與抗彎彈性模數有顯著之正相關存在 ($r = 0.92$)。黃彥三等 (1993) 以打音法與超音波法評估原木材質之研究，指出以平均值而言，利用打音法與超音波法均能測出相近之數值，但以超音波法所得數值分散較大，而打音法可得較高之再現性。陳載永與鍾建有 (1995) 以打音頻譜分析花旗松、紅欒木、冰片樹、檜木、西部鐵杉與柳桉等六種實木之彈性模數，結果指出除西部鐵杉與柳桉外，其餘樹種之打音動彈性模數與抗彎彈性模數之 R^2 值達 0.44-0.87。陳載永與葉政翰 (1996) 再就打音頻譜分析法評估木材之彈性模數，結果指出以此法求得之動彈性模數會較抗彎彈性模數大，但 R^2 值可達 0.82。

(四) 應用打音法建立機械應力分等等級

木製品之應力分等係依據材料特性作為機械性能之指標，欲達到最終尚能應用之目的，一般多利用不會造成材料損壞或產生殘留應力

影響材料未來應用之方法，亦即非破壞性評估，由非破壞性檢測法評估彈性模數，作為機械分等之依據，如北美應用之撓曲法所設計之 Stress-O-Matic 及 Continuous-Lumber-Tester 兩種機械作業設備。

前述以打音法所得之 $DMOEf$ 相當接近實際之抗彎彈性模數 (MOE)，因此以 $DMOEf$ 值作為機械分等之依據，依 CNS 14630 機械分等區分為 E50、E70、E90、E110、E130、E150 等六個等級，其與以 MOE 值進行分等所得結果如表 6 所示，同時，由各等級內彈性模數之平均值與標準偏差，可計算出各等級內彈性模數之 95% 下限水準值，如下式 (6)，亦即此一等級內集成元之彈性模數有 95% 之機率高於該數值。

$$95\% \text{ 下限水準值} = X - 1.645S \quad (6)$$

其中， X 為平均值， S 為標準差

另由各等級之 $DMOEf$ 與 MOE 比較發現，本試驗中除 2 by 6 杉木集成元 E110 等級外，其他各等級材， $DMOEf$ 值約較 MOE 值大約 0.16-2.80%；2 by 8 杉木集成元，則 $DMOEf$ 值約較 MOE 值大約 1.66-6.53%，相當接近，因此，以打音法作為評估集成元應力分等應屬可行之法。

表 6. 機械應力分等等級

Table 6. Graded sawn lumber according to machine stress rated.

Item	Grade	DMOEF (kgf/cm ²)		MOE (kgf/cm ²)	
		Mean	95 % limit	Mean	95 % limit
2- by 6-inch China-fir laminae	E50	56177 (4417)	48911	55553 (4365)	48373
	E70	73694 (4047)	67037	72689 (3985)	66134
	E90	90052 (6175)	79894	89908 (5581)	80727
	E110	105623 (4293)	98561	107527 (5764)	98045
	E130	126014 (2134)	122503	125197 (4686)	117488
	E150	151350 -	-	147225 -	-
2- by 8-inch China-fir laminae	E70	80330 (6000)	70460	75408 (3424)	69776
	E90	92703 (6695)	81690	90828 (5712)	81431
	E110	109920 (6519)	99197	108124 (5611)	98893
	E130	130337 (2623)	126022	127413 (4925)	119312

Values in parentheses represent the standard deviation.

四、結論

本研究以非破壞法來評估杉木集成元之性質，包含目視分等法、超音波法以及打音法以及抗彎試驗等，希冀藉由一系列之試驗，建立各動彈性模數與抗彎彈性模數之關係，與作為建立機械應力分等之依據，經試驗結果發現，兩種目視分等法所區分之各等級材間，並無法建立一顯著之趨勢，亦即以目視分等等級來作為評估集成元材質之依據並不妥當，而直接以超音波法與打音法之音速作為評估集成元之彈性模數時，其 R^2 值分別為 0.40-0.54 與 0.68-0.71，已有相當程度之正相關，而考慮密度因素，以動彈性模數表示時，其超音波動彈性模數 (DMOEV) 與打音動彈性模數 (DMOEF) 與抗彎彈性模數 (MOE) 之 R^2 值分別為 0.50-0.65 與 0.82-0.90，以 DMOEF 值評估 MOE 值較準確，因此，如欲以非破壞技術做為機械應力分等作業，打音非破壞法應屬可行。

謝誌

本研究承台大實驗林管理處 (99A03) 與行政院國家科學委員會經費 (NSC-98-2313-B-005-038-MY2) 補助，特此致謝。

五、參考文獻

- 中華民國國家標準法 CNS 14630 (2002) 針葉樹結構用製材。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準法 CNS 14631 (2002) 框組壁工法結構用製材。經濟部標準檢驗局。
- 吳順昭、黃彥三、高健章 (1974) 強制振動法木材彈性模數之測定。中華林學季刊 7(2) : 49-55。
- 黃彥三、熊如珍、陳欣欣 (1990) 打音頻譜分析應用於材質評估之可行性。林產工業 9 (1) : 43-54。
- 黃彥三、陳欣欣、漆陞忠 (1993) 非破壞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。
- 陳載永與鍾建有 (1995) 應力波非破壞測定法-

檢測六種實木之靜曲彈性模數。林產工業 14(3) : 363-372。

- 陳載永與葉政翰 (1996) 樹種對三種非破壞性檢定義檢測木材彈性模數之影響。林產工業 15(2) : 285-294。
- 蔡如藩 (1985) 木材力學性質。徐氏基金會，台北，台灣。pp.61-78。
- ASTM D-245 (1999) Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber. Philadelphia, PA.
- Burdzik, W. M. G. and P.D. Nkwera (2002) Transverse vibration tests for prediction of stiffness and strength properties of full size *eucalyptus grandis*. For. Prod. J. 52(6): 63-67.
- Courchene, T., F. Lam and J. D. Barrett (1998) The effect of edge knots on the strength of SPF MSR lumber, For. Prod. J. 48(4): 75-81.
- Galligan, WL (1964) A status report-nondestructive testing in wood. For. Prod. J. 14(5): 221-227.
- Green, D. W. and K. A. McDonald (1993) Investigation of the mechanical properties of red oak 2 by 4's. Wood and Fiber Science. 25(1): 35-45.
- Halabe, U. B., G. M. Bidigalu, H. V. S. Gangarao and R. J. Ross (1997) Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. Materials Eval. 55(9): 1013-1018.
- Haines D. W., J. M. Leban and C. Herbe (1996) Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. Wood Sci. Technol. 30(4): 253-263.
- Jayne, B (1959) Vibrational properties of wood as indices of quality. For. Prod. J. 9(11): 413-416.
- Ilic, J. (2001) Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry

- Eucalyptus delegatensis* R. Baker. Holz als Roh-und Werkstoff. 59: 169-175.
- Markwart, L. J. and T. R. C. Wilson (1935) Strength and related properties of woods grown in the United States. USDA Tech. Bulletin 479. Washington, DC. P.40
- Rajesjwar, B., D. A. Bender and D. E. Bray (1997) An Ultrasonic Technique for Predicting Tensile Strength of Southern Pine Lumber. Transactions of the ASAE(40): 1153-1159.
- Ross, R. J. and R. F. Pellerin (1988) NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. For. Prod. J. 38(5): 39-45.
- Ross, R. J. and R. F. Pellerin (1991) Stress wave evaluation of green material: Preliminary results using dimension lumber. For. Prod. J. 41(6): 57-59.
- Sandoz, J. L. (1989) Grading of construction timber by ultrasound Wood Sci. Technol. 23: 95-108.
- Sandoz, J. L. (1993) Valorization of Forest Products as Building Materials Using Non-destructive Testing. Proceeding of the 9th ISNTW, pp.103-109.
- Xu, P. (2002) Estimating the influence of knots on the local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber. Wood Sci. Technol. 36: 501-509.
- Wagner, F. G., T. M. Gorman and S.Y. Wu. (2003) Assessment of intensive stress-wave scanning of Douglas-fir trees for predicting lumber MOE. For. Prod. J. 53(3): 36-39.
- Wang S. Y., J. H. Chen and K. P. Hsu (2005) Effect of planting density on visually graded lumber and mechanical properties of Taiwania. Wood and Fiber Science. 37(4): 574-581.
- Wang S. Y., J. H. Chen, M. J. Tsai, C. J. Lin and T. H. Yang (2008) Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. J. Mat. Process. Technol. 208: 149-58.

