

研究報告

非破壞性檢測技術應用於南方松木材彈性模數之探討

鄭雅文¹ 林蘭東² 李佳如³ 楊德新^{1*}

【摘要】木材之抗彎彈性模數表示木材在受力後之應力與應變之關係，其值也是木材在機械分等中的主要依據，爲了快速而有效的進行木材等級區分，本研究主要利用3種非破壞檢測技術（超音波法、應力波法、打音法）探討其應用於評估不同斷面尺寸木材抗彎彈性模數之適用性。結果指出，本次南方松木材製品之抗彎彈性模數可分爲L50級~L200級，以3種非破壞檢測技術所得之音速值與動彈性模數評估南方松木材製品之抗彎彈性模數時，其 r^2 值分別爲0.53~0.55與0.69~0.72，而進一步以多變項線性迴歸分析更能建立較佳之預測模型，其 r_a^2 值0.719~0.893，其中，又以考量動彈性模數與厚度因子之模式2較佳。

【關鍵詞】非破壞檢測技術、南方松、彈性模數

Research paper

Application of Nondestructive testing to evaluate modulus of elasticity of Southern pine (*Pinus* spp.) wood

Ya-Wen Cheng¹ Lang-Dong Lin² Chia-Ju Lee³ Te-Hsin Yang^{1*}

【Abstract】Modulus of elasticity (MOE) is a kind of relationship between stress and strain of wood under a given force, the value is also the key indicator in structural lumber grading system. For rapidly, effectively and accurately grading wood, Southern pine lumber were evaluated nondestructively with three nondestructive testings, including ultrasonic wave, stress wave and tap tone methods. Then the results were compared with the static MOE determined by static bending test. The experimental results indicated that L50 to L200 grades of Southern pine lumber were found after E-grading. Additionally, three nondestructive testings predicted the MOE of Southern pine lumber with linear regression, the r^2 value were ranged from 0.53~0.55 and 0.69~0.72 for velocity (V) and dynamic MOE (DMOE), respectively. Compared to simple linear regression models, the well relationships were found, the r_a^2 value ranging from 0.719~0.893, after

1. 國立中興大學森林學系，研究生及副教授

Graduate student and Associate Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University

2. 國立雲林科技大學文化資產維護系，助理教授

Assisatnt Professor, Department of Cultural Heritage Conservation, National Yunlin University of Science and Technology.

3. 國立台灣大學實驗林管理處，研究助理

Research Assistant, The Experimental Forest, National Taiwan University.

* 通訊作者

Corresponding Author, E-mail: tehsinyang@nchu.edu.tw

the multiple linear regression analyzed. Among these models, the model 2 which combined the DMOE and thickness factors was suggested.

【Key words】 Nondestructive testing, Southern pine, Modulus of elasticity

一、前言

南方松 (*Pinus* spp., Southern pine) 包含了大王松 (*Pinus palustris*, Long leaf pine)、芒刺松 (*Pinus echinata*, Short leaf pine)、德達松 (*Pinus taeda*, Loblolly pine)、濕地松 (*Pinus elliotti*, Slash pine) 等松科松屬之木材，主要生長於阿拉巴馬州、阿肯色州、佛羅里達州、喬治亞州、路易斯安那州、密西西比州、北卡羅來納和南卡羅來納州、奧克拉荷馬州、田納西州、德克薩斯州和維吉尼亞州的林地，佔地面積達 7800 萬ha。依據南方林業產品協會 (Southern Forest Products Association, SFPA) 資料指出南方松具有高強度、耐用性佳、釘著強度佳以及良好的保存處理性等優點，是一種多用途的耐久性材料，同時在美國南方森林裡，更是供貨量最穩定的樹種，從1950年起南方松森林已超過2倍，在2040年前，其數量可再增加約20%，亦即達到3.4億m³，是相當豐沛的木材資源，同時南方松亦常用於建築結構，如地板和屋架、托樑等木構造構件 (Southern Forest Products Association, 2013)。

國內亦常見到南方松在室內外的使用，如步道、平台、欄杆等，亦常用於木構造建築構材，過去可以看到透過目視分等的方式進行木材品質之判定，以結構用製材而言，多以節、弧邊、割裂、木理彎曲、纖維走向傾斜比、平均年輪寬以及其他腐朽、彎曲、翹曲與扭曲等缺點進行 (CNS 14630, 2011)。Galligan和McDonald (2000) 指出早在1920年代即可見目視等級區分材在木材結構市場之應用，而不同之樹種、尺寸所對應之目視等級區分材之設計值亦有所不同。

而考量木構件作為木質結構之設計上，除目視等級區分材外，木材之彈性模數 (Modulus

of elasticity, MOE) 可被視為結構設計評估因子之一，由於彈性模數與強度常有良好之關係，因此木材之彈性模數值若能透過快速且有效的測定，則可提供工程人員或是設計單位做經濟與符合安全之結構設計參考依據。木材之彈性模數依其測定方法可分為靜彈性模數與動彈性模數兩大類，其中，動彈性模數多賴以非破壞性檢測技術 (Nondestructive testing, NDT) 進行。非破壞檢測技術應用於木材製品之設計應力評估始自於1950年代 (Ross *et al.*, 1991)，而受惠於近年非破壞性檢測設備與技術之發展，透過振動法、打音法、超音波與應力波法等評估木材之動彈性模數與靜彈性模數間具有良好之相關性 (Sandoz, 1989; Ross & Pellerin, 1988, 1991; Ross *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2008; 李佳如、楊德新, 2010; 李佳如等, 2014)，此也說明木材特有之音學性質可做為木材強度性質之評價基礎 (Achim *et al.*, 2011)。

美國農業部森林產品實驗室研究指出過去幾十年來，無論是圓木、製材或枕木，其利用機械等級區分或應力等級區分木材之應用有增加之趨勢 (Galligan & McDonald, 2000; Kretschmann, 2010)，但是在工業上，應用前述NDT法進行木材分等之作業仍較少數，主要的結構用材仍以目視等級區分為主。SFPA 依據南方松木材標準分級規定與出口分級規定，即將南方松分為一級 (Dressed No.1)、二級 (Dressed No.2)、三級 (Dressed No.3) 與四級經濟級 (Dressed No.4 Economy)，其亦是以目視品等作為分級之依據。同樣的結果亦可見於我國鄰近之日本，依據日本木材輸出振興協會資料顯示，日本之柳杉製材除做為結構用集成材外，亦多以目視等級區分為主。然Wang等

(2008) 研究顯示，木材雖依CNS 14631之目視等級區分為結構級、標準級與普通級，但各等級間之木材彈性模數分散大，即結構級者亦有低彈性模數之木材，而普通級亦有具高彈性模數之木材者，故依目視分等未能有效區分彈性模數等級，相對地，機械等級區分對於木材彈性模數等級，則具有較高之信賴性與可靠性。相似的結果，李佳如與楊德新 (2010) 分別以CNS 14630與CNS14631兩種目視分等法評估杉木製材結果亦顯示，目視分等未能有效區分等級材之抗彎彈性模數。因此，在目視分等未能完整表現木材強度等級差異之狀況下，如何透過快速、簡便且準確之方式評估木材之強度等級，成爲一重要之課題。

本研究主要以3種國內常應用之非破壞性檢測技術：打音法、超音波法與應力波法，進

行不同尺寸規格之南方松木材製品之非破壞性評估，並透過萬能強度試驗機進行南方松木材抗彎彈性模數之確定，探討3種NDT法應用於評估南方松木材製品抗彎彈性模數之可行性以及準確性，以做爲未來我國工廠應用之參考。

二、研究方法

(一) 試驗材料

爲究明不同斷面尺寸木材之影響效益，本研究選取商用南方松 (Southern pine, *Pinus spp.*) 乾燥木材製品，購自新竹縣橫山鄉正昌製材有限公司，其斷面尺寸分別爲25 × 89 mm、25 × 140 mm、38 × 89 mm、38 × 140 mm、38 × 184 mm、38 × 235 mm，長度爲2000 mm，詳如表1所示。

表1. 南方松木材製品之尺寸與數量

Table 1. Dimensions and quantities of Southern pine lumbers

Specimens ID	Group	Thickness (mm)	Width (mm)	Quantity
A	1"×4"	25	89	31
B	1"×6"	25	140	39
C	2"×4"	38	89	45
D	2"×6"	38	140	32
E	2"×8"	38	184	34
F	2"×10"	38	238	30

(二) 試驗方法

1. 超音波法/應力波法

使用超音波儀 (SYLVATEST Trio, 22 kHz) 與應力波儀 (FAKOPP Enterprise, Fakopp 2D) 測定其縱向音速試驗，量測音波傳遞過南方松製材所需之時間，計算其超音波速 (Vu) 與應力波速 (Vs)。而一般固體材料之音速 (Vu) 與其彈性模數 (DMOEU) 及密度 (ρ) 之間有次式 (1) 之關係，因此可藉此計算出南方松製材之超音波動彈性模數 (DMOEU) 與應力波動彈性模數

(DMOEs)。

$$DMOE = V^2 \times \rho \dots\dots\dots(1)$$

2. 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：

$$Vf = 2fr \times L \dots\dots\dots(2)$$

$$DMOEF = 4fr^2 \times L^2 \times \rho \dots\dots\dots(3)$$

式中，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)

3. 抗彎試驗

參考ASTM D 198 (2015) 標準進行，將經非破壞試驗後之南方松製材以萬能強度試驗機 (SHINADZU, AG-250NKIC) 進行三分等載重抗彎試驗，載重速度5 mm/min，求其比例限度內之抗彎彈性模數 (MOE)。

$$MOE (GPa) = \frac{23P_p L^3}{108\delta b h^3} \dots\dots\dots(4)$$

式中，L為跨距 (m)；b為試材寬度 (m)；h為試材厚度 (m)；P_p為比例限界內上限載重與

下限載重差值 (N)；δ為P_p相對之跨距中央之彎曲變形量 (m)。

三、結果與討論

(一) 南方松木材製品之基本性質

表2為南方松木材製品之彈性模數值，整體而言，以斷面尺寸較小 (Group A) 者，具有較佳之抗彎彈性模數 (15.9 GPa)，經變異數分析與統計檢定 (α=0.05) 後顯示，其明顯優於其他組別，而斷面尺寸較大者，則有較低之抗彎彈性模數表現 (Group E與Group F)。然木材厚度同為38 mm者，不同寬度組間則無顯著差異 (Group C~F)，寬度較大者之抗彎彈性模數較整體稍低，可能與材面品質有關，主要因板面越寬其可能存在之節與缺點比例較大所致。

表2. 南方松木材製品之彈性模數值

Table 2. MOE values of tested Southern pine lumbers

Specimens ID	N	Density (kg/m ³)	DMOEU (GPa)	DMOES (GPa)	DMOEF (GPa)	MOE (GPa)	
						Mean	Median
A	31	646 ^c	17.7 ^c	16.4 ^c	16.6 ^b	15.9 ^c	16.1
		(90)	(3.9)	(3.3)	(3.8)	(3.8)	
B	39	603 ^{bc}	13.6 ^b	13.2 ^b	12.4 ^a	10.9 ^b	11.4
		(46)	(2.9)	(2.2)	(2.9)	(2.6)	
C	45	599 ^{bc}	12.9 ^{ab}	11.6 ^{ab}	12.4 ^a	8.2 ^a	8.6
		(93)	(4.2)	(3.3)	(4.0)	(2.3)	
D	32	540 ^a	12.5 ^{ab}	12.4 ^{ab}	11.5 ^a	8.3 ^a	8.3
		(44)	(2.6)	(2.2)	(2.4)	(1.4)	
E	34	613 ^c	10.8 ^a	10.3 ^a	10.6 ^a	6.6 ^a	7.4
		(85)	(4.0)	(3.4)	(4.2)	(2.0)	
F	30	552 ^{ac}	11.5 ^{ab}	11.1 ^{ab}	11.3 ^a	6.6 ^a	6.1
		(77)	(4.8)	(4.0)	(4.3)	(2.1)	

Values in parentheses represent the standard deviation; N: The number of repetitions. Different letters show significant differences at the 0.05 level by the Tukey test of ANOVA.

另外，不同尺寸之南方松木材製品經非破壞檢測技術所得之動彈性模數均有較抗彎彈性模數為高之趨勢，整體平均而言，動彈性模數約較抗彎彈性模數高約3.3%~11.3% (Group A)、14.2%~24.9% (Group B)、41.2%~56.2% (Group C)、38.1%~50.3% (Group D)、55.4%~63.5% (Group E) 與69.2%~74.4% (Group F)，與表2所示各斷面抗彎彈性模數平均值相較，顯示有隨抗彎彈性模數下降，其動彈性模數值有高估之趨勢，此可能與影響木材抗彎彈性模數之因子如節等缺點所存在位置有關，如木材分等中最大缺點出現百分率為節 (蘇文清等，2007)，若最大節的位置與截面積分布於載重跨距內，則大大影響木材之抗彎性能，反之，則影響較低，然對於以音速為主之非破壞性檢測技術，則尚未能直接反應節對木材抗彎彈性模數之影響，此外，節之密度較高，木材表面節較多者，其密度值亦有可能較高，因此在音速值未能反映與密度可能因節而增大兩者因子下，其依據音速值與密度所計算之動彈性模數亦有可能增大。

進一步將抗彎彈性模數依CNS 11031集成元機械等級區分為L50級~L200級 (表3)，各等級中，以L80級所佔比例最高 (15.2%)，其次為L70級的11.9%與L110級的10.9%，整體來說L70級以上之南方松木材製品約佔整體之73.0%。另外也可以發現，動彈性模數隨抗彎彈性模數等級之增加 (<L50級~L200級之抗彎彈性模數為4.1~20.7 GPa) 而有增大之趨勢，其中超音波動彈性模數為6.4~22.3 GPa，應力波動彈性模數為6.6~20.1 GPa，打音動彈性模數為5.9~20.9 GPa，但隨等級增大，動彈性模數與抗彎彈性模數之差異有減少之趨勢，以超音波動彈性模數而言，超音波動彈性模數分別約較抗彎彈性模數高約50.9~68.9% (L100級以下)、26.1~27.0% (L110級~L125級)、11.5~16.6% (L140級~L160級)、8.1~8.2% (L180級~L200級)，應力波動彈性模數與打音動彈性模數亦有相似的結果，整體而言，應力波動

彈性模數約較抗彎彈性模數高約-2.6~61.2%，而打音動彈性模數則約較抗彎彈性模數高約1.1~59.82%。而造成此現象之原因亦可能與材質之變異性與強度等級間有關所致，即等級較佳之南方松木材製品材質較等級低者變異小且穩定，由表2可知Group A有較佳之抗彎彈性模數 (15.9 GPa)，其變異係數為23.9%，而Group E與Group F有較低之抗彎彈性模數 (6.6 GPa)，其變異係數為29.7~32.0%。

此外，南方松木材製品經分級後，亦可發現各項音速值隨動彈性模數值等級之下降而減低，其最低之L50級僅約L200級之70.1~74.9%與37.5~42.9%，而抗彎彈性模數則為26.9%。

(二) 南方松木材製品之彈性模數相關性

圖1為南方松木材製品之動彈性模數與抗彎彈性模數之線性迴歸分析，抗彎彈性模數與各項音速值相關性之決定係數 (r^2) 為0.53~0.55；而動彈性模數與抗彎彈性模數之 r^2 值為0.69~0.74，顯示應用動彈性模數可適時的反應南方松木材製品之抗彎性質，另由均方根誤差 (Root mean square error, RMSE) 值可見 (表4)，其值約為2.00~2.71，其值愈小，則代表預測值與實測值之差異愈小，亦表示該預測模式具有可信賴性。過去的研究也指出透過應力波速可有效的評估南方松木材之抗彎彈性模數，其 r^2 值為0.45 (Halabe *et al.*, 1997)，Wang等 (2008) 以超音波法評估斷面尺寸為38×89 mm²之南方松木材性質亦指出，超音波動彈性模數與抗彎彈性模數之 r^2 值為0.82，稍優於本研究，此可能係因斷面尺寸之影響所致。

因此，進一步區分不同斷面尺寸之南方松木材製品，其抗彎彈性模數與動彈性模數之關係如表5所示，可以發現不論是超音波動彈性模數、應力波動彈性模數與打音動彈性模數均與抗彎彈性模數具有高度相關，其 r^2 值為0.73~0.93間，明顯較不分群者為佳 (r^2 值為0.69~0.74)，且均方根誤差值亦降至0.42~1.26，顯示將不同斷面尺寸之南方松木材

表3. 南方松彈性模數分等材之彈性模數性質

Table 3. Modulus of elasticity of E-grading Southern pine lumber

Grade	N	Density (kg/m ³)	Vu (m/s)	Vs (m/s)	Vf (m/s)	DMOEU (GPa)	DMOES (GPa)	DMOEF (GPa)	MOE (GPa)
L200	6	705 ^d (53)	5631 ^f (35)	5343 ^g (58)	5444 ^g (105)	22.3 ^h (1.8)	20.1 ⁱ (1.7)	20.9 ^m (1.7)	20.7 ^g (0.5)
L180	5	674 ^{cd} (73)	5536 ^{ef} (84)	5300 ^{fg} (28)	5391 ^{fg} (95)	20.6 ^{gh} (1.7)	18.9 ^{hi} (1.9)	19.5 ^l (1.4)	19.1 ^{fg} (0.5)
L160	7	664 ^{cd} (69)	5276 ^{def} (191)	5115 ^{efg} (200)	5134 ^{efg} (195)	18.4 ^{fg} (1.1)	17.3 ^{gh} (0.7)	17.4 ^k (0.7)	16.5 ^{ef} (0.6)
L140	7	684b ^{cd} (73)	5024 ^{def} (224)	4829 ^{efg} (134)	4897 ^{efg} (269)	17.2 ^{ef} (0.9)	15.9 ^{fg} (1.0)	16.3 ^j (0.8)	14.7 ^{de} (0.6)
L125	12	610 ^{abcd} (48)	5204 ^{de} (171)	5014 ^{ef} (136)	5067 ^{ef} (214)	16.5 ^{def} (1.6)	15.3 ^{efg} (1.1)	15.7 ⁱ (2.0)	13.0 ^{de} (0.3)
L110	23	593 ^{abcd} (56)	4966 ^{de} (251)	4807 ^{de} (201)	4806 ^{ef} (258)	14.6 ^{def} (1.7)	13.7 ^{ef} (1.2)	13.7 ^h (2.0)	11.6 ^{de} (0.4)
L100	16	621 ^{abcd} (66)	5025 ^d (250)	4802 ^{de} (301)	4877 ^{de} (288)	15.7 ^{de} (1.8)	14.3 ^{ef} (1.5)	14.8 ^g (2.1)	10.4 ^d (0.2)
L90	21	582 ^{abc} (53)	4975 ^d (348)	4866 ^{de} (277)	4800 ^{de} (332)	14.5 ^{de} (2.3)	13.8 ^{ed} (1.6)	13.5 ^f (2.2)	9.4 ^{cd} (0.3)
L80	32	603 ^{abc} (73)	4851 ^{cd} (435)	4650 ^{cde} (402)	4718 ^{cde} (376)	14.2 ^d (2.8)	13.0 ^{de} (2.4)	13.5 ^e (2.5)	8.4 ^{cd} (0.3)
L70	25	589 ^{abc} (83)	4392 ^{bc} (477)	4394 ^{bcd} (336)	4271 ^{bcd} (392)	11.3 ^c (2.1)	11.3 ^{cd} (1.6)	10.7 ^d (2.1)	7.5 ^{bc} (0.2)
L60	17	566 ^{bc} (91)	4239 ^b (377)	4208 ^{bc} (335)	4197 ^{bc} (300)	10.1 ^{bc} (2.0)	9.9 ^{bc} (1.5)	9.9 ^c (1.8)	6.5 ^b (0.3)
L50	16	545 ^a (77)	3948 ^{ab} (465)	4003 ^b (408)	3966 ^b (486)	8.4 ^{ab} (1.2)	8.6 ^{ab} (1.2)	8.5 ^b (1.5)	5.5 ^{ab} (0.3)
<L50	24	529 ^a (82)	3484 ^a (519)	3532 ^a (469)	3336 ^a (650)	6.4 ^a (1.4)	6.6 ^a (1.3)	5.9 ^a (1.8)	4.1 ^a (0.7)

Values in parentheses represent the standard deviation. Different letters show significant differences at the 0.05 level by the Tukey test of ANOVA.

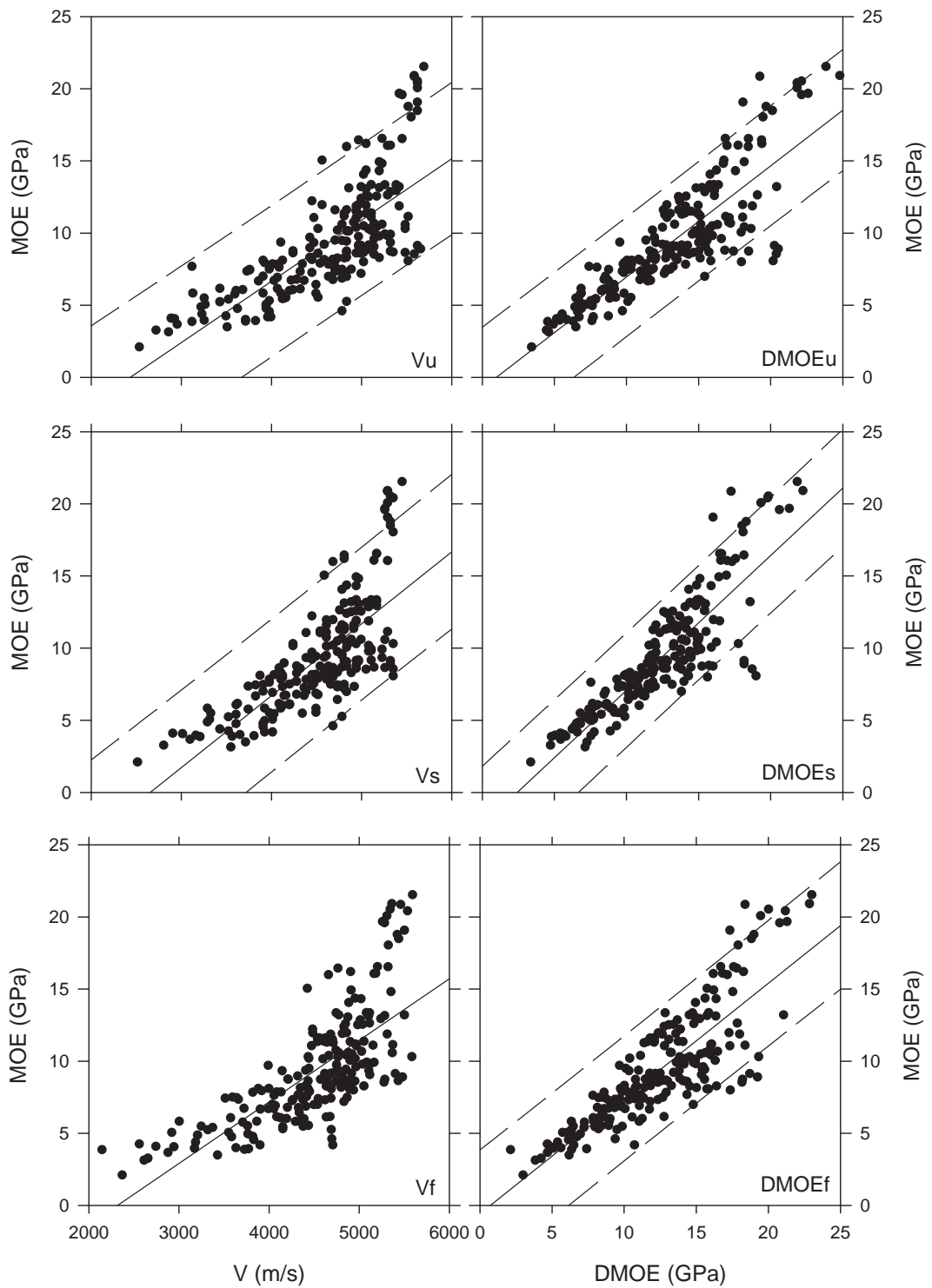


圖1. 音速值與動彈性模數與抗彎彈性模數之線性迴歸圖
Fig. 1. Linear regression plots with velocity, DMOE and MOE.

表4. 南方松木材製品之非破壞試驗性質與抗彎彈性模數之相關性

Table 4. Relationships between NDT and MOE of southern pine lumber

		Regression formula $y = ax + b$		r^2	RMSE	F value
y	x	a	b			
MOE	DMOEU	0.77	-0.75	0.72	2.09	539.0***
MOE	DMOES	0.93	-2.26	0.74	2.00	605.3***
MOE	DMOEF	0.80	-0.57	0.69	2.18	474.2***
MOE	Vu	0.004	-10.33	0.55	2.65	257.9***
MOE	Vs	0.005	-13.24	0.54	2.67	248.8***
MOE	Vf	0.004	-9.89	0.53	2.71	235.9***

*** Significant at 0.1% level (P<0.001)

表5. 不同尺寸之南方松木材製品非破壞試驗性質與抗彎彈性模數之相關性

Table 5. Relationships between NDT and MOE of each southern pine lumber size

Group	Regression formula $y = ax + b$				r^2	RMSE	F value
	y	x	a	b			
A	MOE	DMOEU	0.93	-0.58	0.93	1.04	360.6***
	MOE	DMOES	1.07	-1.60	0.89	1.26	238.5***
	MOE	DMOEF	0.97	-0.16	0.93	1.02	380.4***
B	MOE	DMOEU	0.81	-0.12	0.86	0.98	225.3***
	MOE	DMOES	1.10	-3.65	0.89	0.88	586.8***
	MOE	DMOEF	0.84	0.47	0.91	0.78	370.9***
C	MOE	DMOEU	0.52	1.51	0.87	0.84	296.3***
	MOE	DMOES	0.66	0.55	0.86	0.88	267.3***
	MOE	DMOEF	0.56	1.35	0.90	0.74	403.4***
D	MOE	DMOEU	0.48	2.32	0.84	0.57	155.2***
	MOE	DMOES	0.57	1.28	0.79	0.65	110.1***
	MOE	DMOEF	0.55	2.04	0.91	0.42	305.1***
E	MOE	DMOEU	0.43	1.97	0.76	0.99	99.4***
	MOE	DMOES	0.52	1.28	0.79	0.92	119.5***
	MOE	DMOEF	0.41	2.22	0.80	0.89	12.78***
F	MOE	DMOEU	0.38	2.24	0.74	1.03	79.5***
	MOE	DMOES	0.45	1.59	0.73	1.04	76.2***
	MOE	DMOEF	0.43	1.71	0.76	0.98	88.7***

*** Significant at 0.1% level (P<0.001)

製品區分後，再進行非破壞性試驗評估，可得較佳之準確性。此外，不同斷面尺寸之南方松木材製品組內均以打音法所得之打音動彈性模數與抗彎彈性模數具有較高之 r^2 值。

而在不同斷面尺寸之南方松木材製品間亦可發現，試材之斷面尺寸可能會影響非破壞性試驗評估結果，以 Group A 為例，其抗彎彈性模數與各項動彈性模數之 r^2 值為0.89~0.93，而當斷面尺寸增大時，如Group F，其 r^2 值為0.73~0.76，即隨斷面尺寸之增大，其相關性有下降之趨勢。此結果可能因斷面尺寸之增大，其潛在之缺點（節、木理傾斜角...）影響抗彎彈性模數所致（Ohlsson *et al.*, 2012）。但整體而言，隨斷面尺寸增大，南方松木材製品之抗彎

彈性模數與動彈性模數雖有降低之趨勢，但其組間變異大，以致相關性不佳，Yang等（2015）以非破壞法評估No.2級之南方松時，亦有類似之結果，隨板材面寬之增大（140 mm~287 mm），其 r^2 值雖會隨下降，但相關性未必不顯著。Wang（2008）以應力波法評估花旗松結構材時亦發現花旗松木材之寬度與應力波動彈性模數間沒有顯著之關係。

(三) 南方松木材製品彈性模數預測模型之建立

本研究中南方松木材製品之彈性模數可能與木材之密度、尺寸、音速與動彈性模數有關，由表6之自相關分析之相關係數也可以看出試材之密度、厚度、寬度、以及非破壞檢測技術所測得之音速、動彈性模數與抗彎彈性模

表6. 抗彎彈性模數與各項因子之自相關分析

Table 6. Correlations among the MOE and various factors

	MOE (GPa)	Density (g/cm ³)	Thickness (mm)	Width (mm)	Vu (m/s)	DMOEU (GPa)	Vs (m/s)	DMOEs (GPa)	Vf (m/s)	DMOEF (GPa)
MOE (GPa)	1.000									
Density (g/cm ³)	0.475	1.000								
Thickness (mm)	-0.670	-0.241	1.000							
Width (mm)	-0.475	-0.210	0.348	1.000						
Vu (m/s)	0.743	0.146	-0.309	-0.271	1.000					
DMOEU (GPa)	0.849	0.545	-0.370	-0.322	0.897	1.000				
Vs (m/s)	0.737	0.109	-0.355	-0.233	0.966	0.847	1.000			
DMOEs (GPa)	0.862	0.563	-0.422	-0.297	0.864	0.974	0.871	1.000		
Vf (m/s)	0.728	0.173	-0.249	-0.226	0.934	0.849	0.918	0.834	1.000	
DMOEF (GPa)	0.834	0.570	-0.318	-0.287	0.833	0.954	0.799	0.944	0.893	1.000

數之相關性，其中，尺寸因子（試材之寬度與厚度）與非破壞檢測所得之音速與動彈性模數為負相關外，餘者均為線性正相關，且為顯著相關，故考量各因子對於南方松木材製品抗彎彈性模數之影響，進一步以多變項線性迴歸分析 (Multiple linear regressions) 來建立模型，進一步應用於評估南方松木材製品之抗彎彈性模數。透過SPSS 17.0採逐步多元迴歸分析法 (Stepwise) 結果如表7所示。由表7可以發現經統計分析後，可分為三種模型 (Model)：模型1排除其他因子，僅以動彈性模數預測抗彎彈性模數；模型2則排除試材密度、試材寬度與音速因子，以動彈性模數與試材厚度預測抗彎彈性模數；模型3則除動彈性模數與試材厚度外，再加入試材寬度因子。迴歸模式中， r^2 值可用來解釋線性迴歸模式的適配度 (Goodness

of fit)，意即說明整個模式的解釋力，但 r^2 值會受到樣本多寡的影響而呈現高估的現象，特別在樣本較小時，愈容易出現高估的問題，因此，本研究以調整後的 r^2 值 (r_a^2) 表示，也就是經自由度處理後，可避免樣本大小而導致高估整個迴歸模式的解釋力。結果顯示，隨因子的增加， r_a^2 值有增大之趨勢，以打音非破壞檢測技術為例，僅以試材之打音動彈性模數 (DMOEF) 評估抗彎彈性模數，其 r_a^2 值為0.694 (模型1)，模型2中，加入試材厚度因子，其 r_a^2 值則增大至0.876，而模型3之 r_a^2 值則小幅增加至0.893，超音波非破壞檢測技術與應力波非破壞檢測技術也有類似的結果，其由模型1至模型3之 r_a^2 值分別為0.719~0.879與0.742~0.877。此外，由表7亦可發現經標準化的係數 (β 係數)，以非破壞檢測技術因子 (β_1) 最大，此亦

表7. 多變項線性迴歸分析

Table 7. Multiple linear regressions

y	x	NDT	Thickness	Width	Constant	r^2	r_a^2
		a (β_1)	b (β_2)	c (β_3)			
MOE	DMOEU	0.771 (0.849)	-	-	-0.746	0.720	0.719
	DMOEU	0.632 (0.696)	-0.182 (-0.412)	-	6.828	0.867	0.866
	DMOEU	0.606 (0.667)	-0.167 (-0.378)	-0.010 (-0.128)	8.126	0.881	0.879
	DMOES	0.934 (0.862)	-	-	-2.255	0.743	0.742
	DMOES	0.764 (0.705)	-0.164 (-0.372)	-	5.063	0.857	0.856
	DMOES	0.732 (0.676)	-0.145 (-0.329)	-0.013 (-0.160)	6.633	0.879	0.877
	DMOEF	0.799 (0.834)	-	-	-0.572	0.695	0.694
	DMOEF	0.662 (0.691)	-0.198 (-0.450)	-	7.419	0.876	0.876
	DMOEF	0.635 (0.663)	-0.180 (-0.409)	-0.011 (-0.142)	8.773	0.894	0.893

Values in parentheses represent the standardized coefficients (Beta).

表示其對抗彎彈性模數之影響力較其他因子為大。綜合以上結果，亦顯示以多變項線性迴歸分析較僅以單因子線性迴歸分析較佳，同時考量模型以簡單有效為原則，建議可以模型2來做為主要的預測模型。

四、結論

本研究主要探討國內常用南方松木材製品之性質並針對不同尺寸之南方松木材製品施以非破壞性檢測技術，評估其與抗彎彈性模數之相關性，其結果指出六種不同尺寸之南方松木材製品以厚度25 mm之南方松木材製品 (Group A與Group B) 之抗彎彈性模數 (10.9~15.9 GPa) 明顯較厚度為38 mm者 (Group C~Group F) 為高 (6.6~8.3 GPa)，經抗彎彈性模數分等後，南方松木材製品之抗彎彈性模數可分為L50級~L200級，其中以L80級佔整體之15.2%，其次為L70級 (11.9%) 與L110級 (10.9%)，整體而言，L70級以上者達73.0%。此外，各項音速值與動彈性模數值亦隨等級之下降而減低，其最低之L50級僅約L200級之70.1~74.9%與37.5~42.9%。

而單純以音速值與動彈性模數評估南方松木材製品之抗彎彈性模數時，其 r^2 值分別為0.53~0.55與0.69~0.72，RMSE則為2.00~2.71；若考量尺寸效應，將不同尺寸之南方松木材製品進行區分後，則動彈性模數與抗彎彈性模數有較佳之相關性，其 r^2 值為0.73~0.93，RMSE則為0.42~1.26。相較於單因子之線性迴歸模式，多變項線性迴歸分析更能建立較佳之預測模型，其 r_a^2 值0.719~0.893，其中，又以考量動彈性模數與厚度因子之模式2較佳。

五、謝誌

本研究承蒙國立臺灣大學實驗林管理處之經費支持，特此致謝。

六、參考文獻

中華民國國家標準CNS 14630 (2011) 針葉樹結

構用製材 經濟部標準檢驗局。

李佳如、楊德新 (2010) 應用非破壞檢測技術評估杉木集成元之抗彎性質 林業研究季刊 32 : 45-60。

李佳如、張聶榕、林志憲、楊德新 (2014) 35年生國產柳杉分等結構用材之機械性質評估 林產工業 33 : 61-70。

蘇文清、陳周宏、陳柏璋、王怡仁 (2007) 荷重跨距內節特徵對台灣杉及杉木抗彎性質的影響 林產工業 26 : 149-157。

Achim, A., Paradis, N., Carter, P., & Hernandez, R. E. (2011) Using acoustic sensors to improve the efficiency of the forest value chain in Canada: A case study with laminated veneer lumber. *Sensors*, 11(6), 5716-5728.

ASTM D 198 (2015) Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Galligan, W. L., & McDonald, K. A. (2000) Machine grading of lumber: Practical concern for lumber producers. Gen Tech Rep FPL-GTR-7 USDA For Serv Forest Prod Lab, Madison, WI. 39 pp.

Halabe, U. B., Bidigalu, G. M., Gangarao, H. V. S. & Ross, R. J. (1997) Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. *Material Evaluation*, 55(9), 1013-1018.

Kretschmann, D. E. (2010) Stress grades and design properties for lumber, round timber, and ties. Wood handbook. Gen Tech Rep FPL-GTR-190 USDA For serv Forest Prod Lab, Madison, WI. 17 pp.

Ohlsson, S., Oscarson, J., Johansson, M., & Kallsner, B. (2012) Prediction of timber bending strength on basis of bending stiffness and material homogeneity assessed from dynamic excitation. *Wood Science*

- Technology*, 46(4), 667-683.
- Ross, R. J., & Pellerin, R. F. (1988) NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. *Forest Products Journal*, 38(5), 39-45.
- Ross, R. J., Geske, E. A., Larson, G. R., & Murphy, J. F. (1991) Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer. Res Rep FPL-RP-502 USDA For Serv Forest Prod Lab, Madison, WI. 17 pp.
- Ross, R. J., & Pellerin, R.F. (1991) Stress wave evaluation of green material: Preliminary results using dimension lumber. *Forest Products Journal*, 41(6), 57-59.
- Ross, R. J., Zerbe, J. I., Wang X., Green, D. W. & Pellerin, R. F. (2005) Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores. *Forest Products Journal*, 55(3), 90-94.
- Sandoz, J. L. (1989) Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23, 95-108.
- Southern Forest Products Association (2013) Southern yellow pine export grades.
- Yang, T. H., Wang, S. Y., Lin, C.J., & Tsai, M. J. (2008) Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials*, 22, 487-493.
- Yang, B.Z., Seals, R. D., Shmulsky, R., Dahlen, J., & Wang, X. (2015) Comparison of nondestructive testing methods for evaluating No.2 Southern pine lumber: Part A, Modulus of elasticity. *Wood and Fiber Science*, 47(4), 375-384.
- Wang, S.Y., Chen, J. H., Tsai, M. J., Lin, C. J. & Yang, T. H. (2008) Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *Journal of Material Processing Technology*. 208, 149-58.
- Wang, X. (2008) Effects of size and moisture on stress wave E-rating of structural lumber. 2008 World Conference on Timber Engineering, June 2-5, 2008, Miyazaki, Japan. PP. 1469-1476.