

研究報告

## 木理角度對單板層積材之聲學、振動與力學性質影響

林志憲<sup>1)</sup> 塗三賢<sup>1)</sup> 林振榮<sup>1)</sup> 楊德新<sup>2,3)</sup>

### 摘要

本研究以非破壞試驗法評估單板層積材(laminated veneer lumber, LVL)之力學強度，由木理角度0°之平行木理方向至木理角度90°之垂直木理方向，以15°為間距區分7種角度，分析木理角度變化對LVL力學性質之影響。研究結果顯示，LVL之力學性質隨著木理角度增加而降低，抗彎性質、抗壓強度和剪力強度分別於木理角度30°、45°和60°之強度損失率高於50%。抗彎性質非破壞性評估方面，利用LVL各木理角度之非破壞性評估與力學性質計算漢金森方程式指數值為2.58，配合平板振動法可以有效預測不同木理角度之MOE ( $R^2$ 為0.97)，其不同木理角度之抗彎預測結果與趨勢皆符合實驗值。

關鍵詞：非破壞試驗法、單板層積材、木理方向、平板振動法、漢金森方程式。

林志憲、塗三賢、林振榮、楊德新。2022。木理角度對單板層積材之聲學、振動與力學性質影響。台灣林業科學37(2):85-98。

<sup>1)</sup> 林業試驗所森林利用組，10066台北市中正區南海路53號 Forest Utilization Division, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Zhongzheng Dist., Taipei City 10066, Taiwan.

<sup>2)</sup> 國立中興大學森林學系，402台中市南區興大路145號 Department of Forestry, National Chung Hsing University, 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan.

<sup>3)</sup> 通訊作者 Corresponding author, e-mail: tehsinyang@dragon.nchu.edu.tw

2022年2月送審 2022年5月通過 Received February 2022, Accepted May 2022.

## Research paper

## Effect of the Grain Direction on Acoustical, Vibrational, and Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber

Chih-Hsien Lin<sup>1)</sup> San-Hsien Tu<sup>1)</sup> Cheng-Jung Lin<sup>1)</sup> Te-Hsin Yang<sup>2,3)</sup>

### 【 Summary 】

The objectives of this study were to evaluate the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) with different grain angles by 3 non-destructive tests (NDTs). The grain angles of LVL ranged from 0° to 90° at 15° intervals. The bending, compression, and shear strength of LVL decreased by 50% when the grain angle respectively increased to 30°, 45°, and 60°. The constant of Hankinson's formula was 2.58 for LVL, calculated with bending properties by the 3 non-destructive methods. The predictive accuracy calculated by Hankinson's formula and plate vibration testing was higher compared to the modulus of elasticity of different grain angles (MOE; with an  $R^2$  value of 0.97) and was close to the experimental results.

**Key words:** non-destructive method, laminated veneer lumber, direction of grain angle, plate vibration testing, Hankinson formula.

**Lin CH, Tu SH, Lin CJ, Yang TH. 2022.** Effect of the grain direction on acoustical, vibrational, and mechanical properties of laminated veneer lumber. *Taiwan J For Sci* 37(2):85-98.

### 緒言

木材或木質建材因為具有獨特紋理、色澤、氣味等特性，常作為裝修、家具或建築材料使用，而木材容易加工的優點，使得設計可具自由度，特別在木藝文創、家具製造以及室內裝修建材應用上，具特色之創意設計以及多角度之變化，往往成為亮點，然而符合設計或裁切造成受力方向之木理(wood grain)角度改變，雖然製造生產達到設計目的，加工或使用上仍有顧慮。木材為非均質之異方向性材料，由於樹木生長方式使切面具有獨特的紋理，具有天然缺點，如節、反應材、木理走向等，其中力學強度受木理角度影響，過去的研究亦可發現，當木材之木理角度越大，其力學強度均有下降之趨勢(Holmberg 2000, Forest Products Laboratory 2010, Kawahara et al. 2015)。因此，木材作為高自由度的創作材料，對於家具或裝修類木材產品，必須考量木理角度對產品

力學強度之影響。

已經有許多科學方法應用於檢測或判斷木材強度，可透過超音波法(ultrasonic wave method)、應力波法(stress wave method)、打音法(tap tone method)和振動法(vibration method)等方式進行，或是導入機器學習法進行材料性質之評估(Fathi et al. 2020)。過去的研究亦指出，透過非破壞性試驗法所得之非破壞性評估與實測值之間具有良好的相關性，Yang et al. (2002)以超音波法進行定向粒片板之非破壞性評估，在全板形態下進行不同木理角度之板面超音波傳遞速度之量測，定向粒片板之力學性質隨著木理角度增加而降低，各木理角度之抗彎彈性模數預測值與實測值具有良好相關性。Ettelaie et al. (2019)比較超音波傳遞與抗彎性質之關係，超音波傳遞路徑分別為表面、端部和上下面共三種方式，其抗彎彈性模數預測值與

實測值誤差範圍為5.8%至10.4%，以端部所得之預測值誤差最小，使用超音波法評估木材為穩定且可靠的非破壞評估方式。板狀型態之材料亦可由平板振動試驗(plate vibration testing, PVT)進行材料性質之量測，Cho (2000a)使用PVT評估定向粒片板結果顯示，經由振動頻率與數值模擬計算板材之抗彎彈性模數與實測值具有良好的相關性，其決定係數( $R^2$ )為0.89，能有效評估板狀材料之抗彎性質。

單板層積材(laminated veneer lumber, LVL)與定向粒片板均具有方向性，且用途上除作為角材使用外，亦可作為板狀或規格尺寸之木材使用，目前亦可見其應用於裝修與家具用材上，透過原木旋切取得單板，對於中小徑木而言，亦具有製材利用率之優勢。有鑑於單板層積材之用途甚廣，其應用上亦非僅為角材之應用，因此本研究以非破壞性試驗法為基礎，評估LVL之聲學與振動性質，並進一步透過不同木理角度之設計，評估LVL在不同木理角度之力學性質，以及利用前述非破壞性試驗與評估之可行性，以提供未來產業在利用時之參考。

## 材料與方法

### 一、試驗材料

本試驗使用放射松單板製造之商用LVL，單板數量與LVL厚度分別為7層12 mm、9層18 mm與13層28 mm，材面尺寸為600×600 mm，平均密度為498 kg m<sup>-3</sup>，平均含水率為10.7%，重複數為20。

### 二、試驗方法

#### 1. 平板振動法

PVT依據利用訊號擷取裝置(NI cDAQ9172 with NI9234, National Instruments, Austin, Texas, USA)，設定敲擊點以每100 mm間距網格化標記如Fig. 1所示，平行木理方向(x)與垂直木理方向(y)數量各為7點，總敲擊處共49點。加速度規(Model 353B16, PCB Piezotronics,

Depew, NY, USA)以蜜蠟黏貼於設定位置(Fig. 1黑點位置為板材下側)，使用衝擊錘(Model: 086C03, PCB Piezotronics, Depew, NY, USA)依序敲擊表面設定之位置(紅點)，並使用模態分析軟體(ModalVIEW, vers. R2, ABSignal, Amadora, Portugal)進行模態分析，並獲得(1,1)、(2,0)及(0,2)三種振動模態頻率，其中(a, b)之a為平行Y方向之共振節線(nodal line)數，b為平行X方向之共振節線數，並參考Cho (2000a)計算平行木理方向動彈性模數(longitudinal dynamic modulus of elasticity by vibration test,  $DMOE_{v_0}$ )與垂直木理方向動彈性模數(transverse dynamic modulus of elasticity by vibration test,  $DMOE_{v_{90}}$ )。

#### 2. 超音波法

前述經平板振動試驗後之LVL，次以超音波儀(22 kHz, Sylvatest Trio, CBS-CBT, Saint-Sulpice, Switzerland)進行全板之超音波傳遞速度(surface velocity,  $V_s$ )之量測，由平行木理方向至與垂直木理方向，並以每15°為間隔，量測不同木理角度之超音波傳遞速度(0°、15°、30°、45°、60°、75°與90°，共計7種角度)，評估不同木理角度對表面超音波傳遞速度之影響，待全板之超音波試驗完畢後，依前述各角度進行抗彎試材之裁切(Fig. 2)，製成長度450 mm與寬度50 mm之試片，復以超音波儀進行抗彎試材端部之超音波傳遞速度(bending velocity,  $V_b$ )量測，並依公式(2)分別計算板面超音波動彈性模數(surface dynamic modulus of elasticity by ultrasonic wave test,  $DMOE_{us}$ )和端部超音波動彈性模數(bending dynamic modulus of elasticity by ultrasonic wave test,  $DMOE_{ub}$ )。

$$V_s \text{ (or } V_b) = L / t \dots\dots\dots (1)$$

$$DMOE_{us} \text{ (or } DMOE_{ub}) = \rho V_s^2 \text{ (or } \rho V_b^2) \times 10^{-9} \dots\dots\dots (2)$$

$V_s, V_b$ 為傳遞速度(m s<sup>-1</sup>)；L為試材長度；t為傳遞時間。

$DMOE_{us}$ 為板面超音波動彈性模數(GPa)； $DMOE_{ub}$ 為端部超音波動彈性模數(GPa)； $\rho$ 為密度(kg m<sup>-3</sup>)。

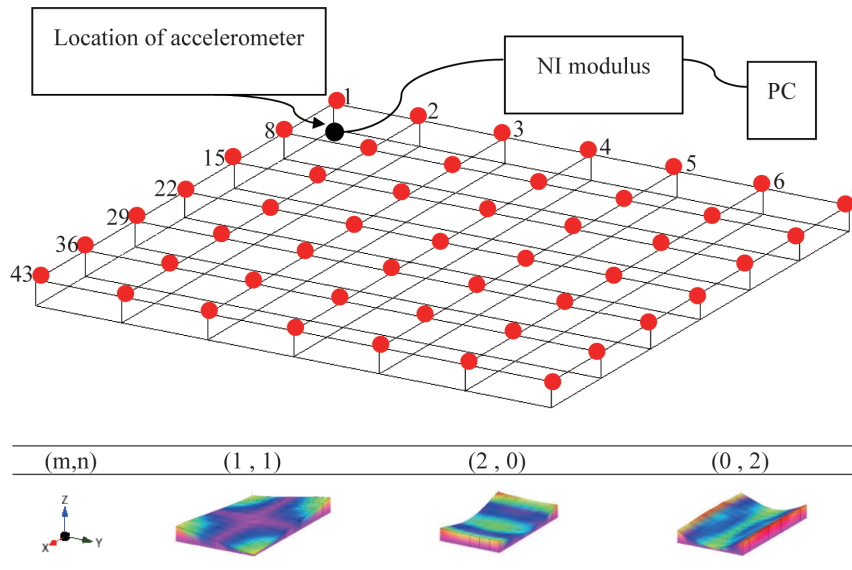


Fig. 1. Diagram of suitable grids on the surface of laminated veneer lumber (LVL) by 100 × 100 mm, an accelerometer placed (black point) on the LVL bottom surface, and 3 main plate vibration mode shapes by the plate vibration test method.

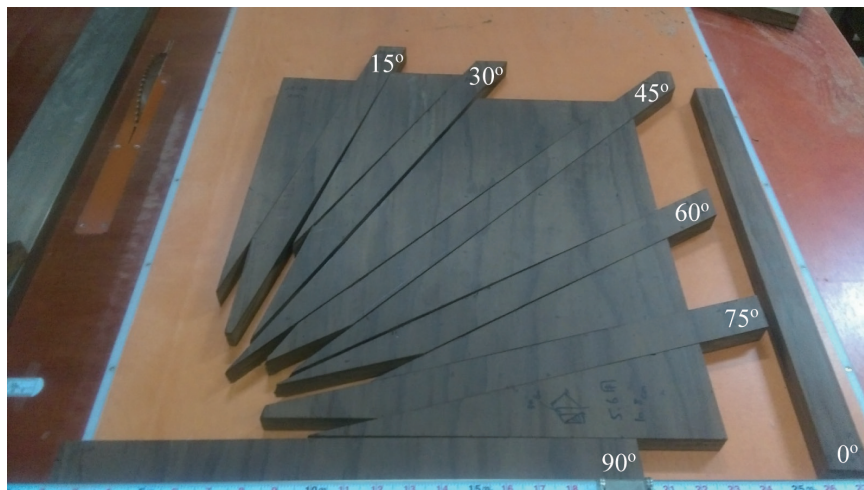


Fig. 2. Bending specimens of laminated veneer lumber (LVL) according to the grain angle on the surface.

3. 抗彎試驗

抗彎試驗依據CNS 454 (2013)以中央集中載重方式進行，載重方向與膠合層垂直，載重速度5 mm min<sup>-1</sup>，利用強度試驗機(AG-IC 250 kN, Shimadzu, Kyoto, Japan)進行抗彎試驗並計算抗彎彈性模數(modulus of elasticity, MOE)與

抗彎強度(modulus of rupture, MOR)。

$$MOE = \Delta PL^3 / 4\delta bh^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$MOR = 3P_{max}L / 2bh^2 \dots\dots\dots (4)$$

MOE為抗彎彈性模數(MPa)；MOR為抗彎強度(MPa)；L為跨距(mm)；b為試材寬度(mm)；h為試材厚度(mm)；ΔP為比例限內上限載重與

下限載重差值(N)； $\delta$  為  $\Delta P$  相對之跨距中央之彎曲變形量(mm)； $P_{max}$  為最大載重值(N)。

4. 抗壓試驗

抗壓試驗依據 CNS 453(2013) 進行，載重速度  $2 \text{ mm min}^{-1}$ ，依據 LVL 之厚度尺寸製作正方形面積( $A_c$ )之抗壓試材( $w = t$ )，試材長度為厚度之 2 倍( $h = 2t$ ) 如 Fig. 3 所示，以公式 5 計算抗壓強度(compression strength,  $C_s$ )。

$$C_s = P_c / A_c \dots\dots\dots (5)$$

$C_s$  為抗壓強度(MPa)； $P_c$  為最大載重值(N)； $A_c$  為載重面積( $\text{mm}^2$ )。

5. 剪力試驗

剪力試驗依據 CNS 455 (2013) 進行，椅型剪斷試材如 Fig. 4 所示，剪斷面積為單板層並且為正方形( $l = w$ )，依據公式 6 計算剪力強度(shear strength,  $S_s$ )。

$$S_s = P_s / A_s \dots\dots\dots (6)$$

$S_s$  為剪力強度(MPa)； $P_s$  為最大載重值(N)； $A_s$  為剪斷面積( $\text{mm}^2$ )。

6. 統計分析

本研究利用 SPSS 統計分析軟體進行變異數分析(analysis of variance, ANOVA)，以 Tukey's 檢定(Tukey's test)各組之間的差異性，其信賴區間為 95%。各項試驗之迴歸式利用 Microsoft Office 之 Excel 軟體進行迴歸分析，檢驗各項迴歸式之顯著性。

結果

一、非破壞性試驗於 LVL 之聲學性質評估

本研究之首先以平板振動法(PVT)進行板狀 LVL 共 49 處敲擊頻率量測，經由軟體分析 LVL 三種振動模態頻率，可以避免材料彎曲及扭轉振動之複合頻率或不易判讀情形，由振動模態分析出 Mode 1 (1,1)、Mode 2 (0,2) 與 Mode 3 (2,0) 模態之頻率，三種厚度 LVL 之頻率與動彈性模數(DMOE $v$ ) 如 Table 1 所示，LVL 三種模態之共振頻率有 mode 3 > mode 1 > mode 2 之

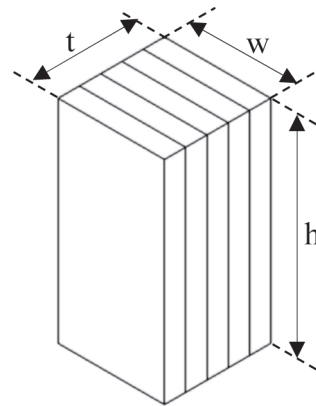


Fig. 3. Compression test specimen of laminated veneer lumber (LVL).

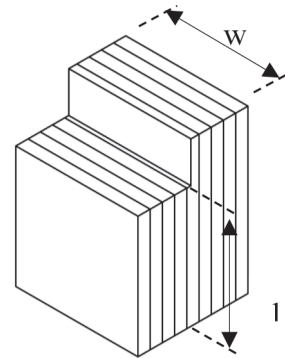


Fig. 4. Shear test specimen of laminated veneer lumber (LVL).

趨勢，而且三種模態之共振頻率隨著 LVL 厚度增加而有提高的趨勢，共振頻率會因為尺寸及材料組成而改變，Cho (2000a) 以平板振動試驗不同厚度之定向粒片板材結果顯示，共振頻率則為 mode 3 > mode 2 > mode 1，由 (2,0) 及 (0,2) 模態之共振頻率分別計算平板振動縱向動彈性模數(DMOE $v_0$ ) 和平板振動橫向動彈性模數(DMOE $v_{90}$ )，縱向動彈性模數之預測結果顯示，DMOE $v_0$  為 7.11 至 9.78 GPa，以厚度 12 mm 所計算之數值最高，厚度 18 和 28 mm 之計算結果則相近；橫向動彈性模數(DMOE $v_{90}$ ) 則隨著 LVL 厚度增加而有降低的趨勢，其數值為 0.49 至 0.84 GPa，顯示 LVL 之 DMOE $v_{90}$  僅為 DMOE $v_0$  之 6.5% 至 9.2%。

PVT 可以獲得板材平行與垂直木理方向之

彈性性質，對於其他角度之非破壞性評估則使用超音波進行，超音波非破壞性評估分別依據LVL之板面傳遞速度( $V_s$ )與抗彎試材端部傳遞速度( $V_b$ )，Table 2為板面超音波傳遞速度之試驗結果，木理角度為 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 和 $90^\circ$ 共7種角度，比較木理角度對超音波傳遞速度之影響，Brown et al. (1952)試驗針葉樹與闊葉樹之縱向超音波傳遞速度為3359至4572  $m s^{-1}$ ，本試驗LVL於木理角度 $0^\circ$ 之板面超音波傳遞速度為4288至4582  $m s^{-1}$ ，三種厚度LVL以12 mm之傳遞速度最快，28 mm次之，最後為18 mm，然而，隨著當木理角度開始增加，則以28 mm厚度之LVL其板面超音波傳遞速度下降最多，三種厚度LVL於木理角度 $90^\circ$ 之板面超音波傳遞速度分別下降至1051、999和910  $m s^{-1}$ ，Huang and Chen (1997)比較不同木理角度對徑向木材音響特性之影響，結果顯示木理角度 $0^\circ$

之平行木理方向具有較佳的音響特性，並且隨著木理角度增加而產生明顯的變化。

比較木理角度變化最大之 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 板面超音波傳遞速度，由二者之異方性( $V_{s_0} / V_{s_{90}}$ )比值顯示，三種厚度LVL之異方性比值分別為4.38、4.30與4.80，Chen and Wang (1999)杉木定向粒片板之超音波傳遞速度異方性為2.93至3.24，Yang et al. (2002)所研究之柳杉定向粒片板則為1.8至1.9，若以木理角度 $0^\circ$ 之板面超音波傳遞速度( $V_{s_0}$ )為基準，板面超音波傳遞速度之損失率隨著木理角度增加而提高， $V_{s_{15}}$ 損失率為18%至25%， $V_{s_{30}}$ 損失率為42%至52%， $V_{s_{45}}$ 損失率為59%至70%， $V_{s_{60}}$ 損失率為68%至76%， $V_{s_{75}}$ 損失率為73%至78%，三種厚度LVL之板面超音波傳遞速度皆以厚度28 mm試材之損失率最高，當木理角度增加並大於 $30^\circ$ 時，三種厚度之板面超音波傳遞速度大幅降低且低於平行木理向( $V_{s_0}$ )

**Table 1. Three vibration mode frequencies of laminated veneer lumber (LVL) by plate vibrational testing (PVT)**

Thickness				DMOE $v_0$	DMOE $v_{90}$
	(1, 1)	(0, 2)	(2, 0)	(GPa)	(GPa)
12 mm	48 Hz (2.56)	45 Hz (3.56)	155 Hz (1.79)	9.78 (4.74)	0.84 (7.35)
18 mm	71 Hz (1.84)	63 Hz (2.67)	206 Hz (4.15)	7.11 (10.37)	0.65 (6.74)
28 mm	98 Hz (1.86)	86 Hz (3.10)	332 Hz (3.11)	7.49 (8.19)	0.49 (6.58)

Values in parentheses are coefficients of variation (%).

DMOE $v$ , dynamic modulus of elasticity by plate vibration testing at  $0^\circ$  (DMOE $v_0$ ) and  $90^\circ$  (DMOE $v_{90}$ ).

**Table 2. The ultrasonic surface velocity ( $V_s$ ) of laminated veneer lumber (LVL) with different grain angles**

Angle	Thickness								
	12 mm			18 mm			28 mm		
	$V_0$	$V_0 / V_{90}$	d%	$V_0$	$V_0 / V_{90}$	d%	$V_0$	$V_0 / V_{90}$	d%
$0^\circ$	4582 (2.27)	4.36 (5.92)		4288 (3.69)	4.30 (5.74)		4347 (3.46)	4.80 (7.32)	
$15^\circ$	3760 (4.31)	3.58 (6.16)	18	3501 (4.99)	3.51 (5.65)	18	3275 (11.63)	3.61 (13.36)	25
$30^\circ$	2635 (5.01)	2.51 (6.35)	42	2363 (7.68)	2.37 (7.29)	45	2077 (11.24)	2.29 (10.93)	52
$45^\circ$	1874 (7.03)	1.79 (6.58)	59	1687 (6.66)	1.69 (7.31)	61	1314 (8.79)	1.45 (7.45)	70
$60^\circ$	1471 (7.08)	1.40 (7.17)	68	1319 (9.18)	1.32 (9.40)	69	1037 (7.93)	1.14 (8.17)	76
$75^\circ$	1251 (6.66)	1.19 (6.55)	73	1121 (6.41)	1.12 (5.90)	74	971 (9.27)	1.07 (7.19)	78
$90^\circ$	1051 (6.02)	1.00 (0.00)	77	999 (3.81)	1.00 (0.00)	77	910 (6.28)	1.00 (0.00)	79

Values in parentheses are coefficients of variation (%).

The d (%) is the decreasing rate of different grain angles ultrasonic surface velocity ( $V_0$ ) for longitudinal ultrasonic surface velocity ( $V_0$ ).

一半以上，Chen and Wang (1999)試驗定向粒片板則為木理角度大於45°時，超音波傳遞速度損失率才會超過50%，透過非破壞試驗性結果顯示LVL較定向粒片板為異方性高的材料，當木理角度增加時板面超音波傳遞速度逐漸減少，而且厚度越大之板面超音波傳遞速度下降越明顯。

板狀型態LVL之非破壞試驗性完成後，三種厚度LVL依據木理角度裁切成抗彎試材，再次進行超音波非破壞試驗，Table 3為LVL抗彎試材之端部超音波傳遞速度(Vb)試驗結果，端部超音波傳遞速度皆高於板面超音波傳遞速度，當木理角度為0°時之超音波傳遞速度提高2.2%至7.3%；木理角度15°為4.2%至16.4%；木理角度30°為4.7%至22.1%；木理角度45°為6.7%至30.7%；木理角度60°為7.5%至30.4%；木理角度75°為7.6%至22.5%；木理角度90°為14.3%至

18.4%，以木理角度45°至60°之差異值最大，板面與端部量測結果之最大差異值為30%，端部量測之試驗結果平均高於板面13%，雖然超音波試驗木材端部所得之預估值與實驗值較為相近(Ettelaei et al. 2019)，但板面超音波傳遞速度為探頭與板面呈45度進行試驗，抗彎試材則為探頭放置端部並平行試材進行，受到探頭角度之影響而減少超音波傳遞時間，由板面與端部超音波傳遞速度之相關性結果顯示(Table 4)，板面與端部之超音波非破壞性評估之間相關性良好，決定係數(R<sup>2</sup>)為0.97，而且使用超音波進行板面非破壞性評估具有更好的便利性。

二、LVL之力學性質

Table 5為木理角度對三種不同厚度LVL力學性質之影響，分別為抗彎彈性模數(MOE)、

**Table 3. Ultrasonic velocity of bending sample (Vb) of laminated veneer lumber (LVL) with different grain angles**

Angle	Thickness								
	12 mm			18 mm			28 mm		
	V <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> / V <sub>90</sub>	d%	V <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> / V <sub>90</sub>	d%	V <sub>0</sub>	V <sub>0</sub> / V <sub>90</sub>	d%
0°	4689 (3.19)	3.83 (3.71)		4420 (4.05)	3.69 (4.77)		4696 (3.86)	4.21 (5.73)	
15°	3927 (4.85)	3.20 (3.92)	16	3770 (4.71)	3.15 (5.59)	15	3902 (4.15)	3.51 (6.21)	16
30°	2766 (4.91)	2.26 (3.47)	41	2661 (3.82)	2.23 (4.82)	40	2665 (3.51)	2.39 (5.59)	43
45°	2008 (4.74)	1.64 (3.47)	57	1944 (3.12)	1.62 (4.88)	56	1899 (3.86)	1.70 (5.87)	60
60°	1591 (4.44)	1.30 (3.29)	66	1561 (3.45)	1.30 (3.52)	65	1477 (5.10)	1.33 (6.07)	68
75°	1355 (3.70)	1.10 (2.18)	71	1337 (3.36)	1.12 (4.77)	70	1233 (3.12)	1.11 (3.55)	74
90°	1226 (2.46)	1.00 (0.00)	74	1197 (4.11)	1.00 (0.00)	73	1116 (3.57)	1/00 (0.00)	76

Values in parentheses are coefficients of variation (%).

The d (%) is the decreasing rate of different grain angles ultrasonic bending velocity (V<sub>0</sub>) for longitudinal ultrasonic bending velocity (V<sub>0</sub>).

**Table 4. Correlations among surface velocity (Vs), bending velocity (Vb), surface dynamic modulus of elasticity by ultrasonic wave test (DMOEus), bending dynamic modulus of elasticity by ultrasonic wave test (DMOEub), MOE, and modulus of rupture (MOR) values analyzed by the linear regression formula (Y = ax + b) for laminated veneer lumber (LVL)**

y	x	a	b	R <sup>2</sup>	F value
Vb	Vs	0.99	293.00	0.97	12,373***
MOE	DMOEus	0.76	0.30	0.95	7077***
MOE	DMOEub	0.71	0.01	0.97	12,419***
MOR	MOE	7.79	0.93	0.92	1579***

\*\*\* p < 0.001.

抗彎強度(MOR)、抗壓強度(Cs)和剪力強度(Ss)，木理角度為0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°共7種角度，LVL之力學性質於木理角度0°時最佳，三種厚度LVL之MOE為6.28至8.48 GPa，MOR為44.69至76.38 MPa，Cs為29.93至34.29 MPa，Ss為6.23至7.90 MPa，四項力學性質經ANOVA變異數與同質性檢定分析結果顯示，各木理角度之LVL力學性質具有顯著差異，並隨著木理角度增加而有降低的趨勢，其中木理角度達到90°時之力學性質最差，以抗彎性質受木理角度之影響最大，木理角度

僅增加15°則厚度12、18和28 mm之MOE分別下降22%、18%和27%，然而木理角度增加至30°時，LVL之MOE則大幅減少至62%、58%和67%，相對於木理角度0°時之MOE損失率為58%至67%，MOR損失率為67%至74%，Cs損失率為41%至56%，Ss損失率則小於10%，對於材料設計強度已有相當大的影響，尤其抗彎性質已大幅減少一半以上。四項力學性質以剪力強度之損失率最小，當木理角度大於60°時，剪力強度之損失率才會大於50%。由木理角度對LVL力學性質之影響顯示，當木理角度大於45°

**Table 5. Mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) with different grain angles**

Thicknessv (mm)	Grain angle (°)							
	0	15	30	45	60	75	90	
12	MOE (GPa)	8.48 <sup>a</sup> (11.30)	6.61 <sup>b</sup> (11.30)	3.19 <sup>c</sup> (8.99)	1.66 <sup>d</sup> (9.53)	0.92 <sup>e</sup> (11.31)	0.92 <sup>e</sup> (9.97)	0.43 <sup>f</sup> (9.84)
	MOR (MPa)	76.38 <sup>a</sup> (11.44)	59.57 <sup>b</sup> (12.38)	26.20 <sup>c</sup> (14.38)	12.76 <sup>d</sup> (17.25)	7.59 <sup>e</sup> (13.69)	5.56 <sup>e</sup> (14.12)	4.71 <sup>e</sup> (18.54)
	Cs (MPa)	29.93 <sup>a</sup> (8.04)	25.52 <sup>b</sup> (9.20)	17.70 <sup>c</sup> (6.30)	13.01 <sup>d</sup> (11.92)	9.45 <sup>e</sup> (7.40)	8.50 <sup>e</sup> (16.39)	7.96 <sup>e</sup> (10.59)
	Ss (MPa)	6.23 <sup>a</sup> (20.81)	5.54 <sup>ab</sup> (12.62)	5.62 <sup>a</sup> (18.27)	4.24 <sup>bc</sup> (30.60)	3.49 <sup>e</sup> (24.46)	3.11 <sup>e</sup> (24.29)	2.92 <sup>e</sup> (13.19)
	MOE (GPa)	6.28 <sup>a</sup> (14.99)	5.13 <sup>b</sup> (10.06)	2.61 <sup>c</sup> (8.82)	1.29 <sup>d</sup> (12.81)	0.79 <sup>e</sup> (14.04)	0.52 <sup>e</sup> (11.77)	0.41 <sup>e</sup> (22.21)
18	MOR (MPa)	48.20 <sup>a</sup> (13.43)	37.72 <sup>b</sup> (21.55)	17.51 <sup>c</sup> (21.08)	8.81 <sup>d</sup> (21.17)	5.89 <sup>de</sup> (21.50)	4.31 <sup>e</sup> (29.00)	17.53 <sup>e</sup> (17.53)
	Cs (MPa)	31.57 <sup>a</sup> (8.90)	24.59 <sup>b</sup> (9.95)	17.09 <sup>c</sup> (6.79)	13.19 <sup>d</sup> (13.11)	10.13 <sup>e</sup> (10.05)	8.24 <sup>e</sup> (9.96)	7.69 <sup>e</sup> (16.03)
	Ss (MPa)	7.90 <sup>a</sup> (16.13)	7.99 <sup>a</sup> (15.74)	6.44 <sup>b</sup> (17.58)	5.70 <sup>bc</sup> (18.66)	4.29 <sup>cd</sup> (17.04)	3.26 <sup>d</sup> (17.72)	3.05 <sup>d</sup> (22.46)
	MOE (GPa)	7.28 <sup>a</sup> (9.92)	5.29 <sup>b</sup> (9.80)	2.40 <sup>c</sup> (8.91)	1.10 <sup>d</sup> (9.33)	0.67 <sup>e</sup> (9.71)	0.45 <sup>e</sup> (15.61)	0.33 <sup>e</sup> (10.12)
28	MOR (MPa)	44.69 <sup>a</sup> (17.60)	29.45 <sup>b</sup> (14.01)	11.63 <sup>c</sup> (12.94)	5.26 <sup>d</sup> (18.58)	3.65 <sup>d</sup> (17.27)	2.85 <sup>d</sup> (16.22)	2.69 <sup>d</sup> (17.76)
	Cs (MPa)	34.29 <sup>a</sup> (12.01)	24.60 <sup>b</sup> (10.14)	15.06 <sup>c</sup> (11.41)	12.02 <sup>d</sup> (12.76)	9.91 <sup>de</sup> (6.13)	8.46 <sup>e</sup> (7.99)	7.21 <sup>e</sup> (13.32)
	Ss (MPa)	6.62 <sup>a</sup> (22.06)	6.23 <sup>ab</sup> (20.78)	6.39 <sup>a</sup> (24.25)	4.93 <sup>abc</sup> (21.94)	4.48 <sup>bcd</sup> (34.98)	3.11 <sup>d</sup> (17.26)	3.17 <sup>cd</sup> (18.26)
	MOE (GPa)	7.28 <sup>a</sup> (9.92)	5.29 <sup>b</sup> (9.80)	2.40 <sup>c</sup> (8.91)	1.10 <sup>d</sup> (9.33)	0.67 <sup>e</sup> (9.71)	0.45 <sup>e</sup> (15.61)	0.33 <sup>e</sup> (10.12)

Values in parentheses are coefficients of variation (%).

Different letters (a~f) in a given row indicate a significant difference at the 0.05 level by Tukey's test and an ANOVA.

MOE, modulus of elasticity; MOR, modulus of rupture; Cs, compression strength; Ss, shear strength.



後，四項力學性質僅MOE持續隨著木理角度增加而減少，抗彎、抗壓和剪力強度經ANOVA變異數與同質性檢定分析結果顯示，於木理角度60°、75°和90°之強度值並無顯著差異。

材料厚度對力學性質之影響方面，當木理角度由0°至90°時，三種厚度LVL之MOE與MOR之損失率大於90%，將木理角度90°之力學強度(Q)與木理角度0°之力學強度(P)以比值(Q/P值)顯示，木質材料之Q/P值為0.20至0.05，Q/P值越小則MOE受木理角度之影響越大(Forest Products Laboratory 2010)，本試驗LVL厚度12、18和28 mm之Q/P值分別為0.050、0.065和0.045，三種厚度LVL之Q/P值相近，顯示木理角度增加對LVL有很大的影響。抗壓強度和剪力強度方面，比較不同木理角度之三種厚度LVL抗壓強度與剪力強度，經ANOVA變異數與同質性檢定分析結果顯示，雖然抗壓強度有隨著單板層數增加而提高的趨勢，但是相同木理角度之抗壓強度與剪力強度並不受材料厚度影響。

Kawahara et al. (2015)試驗木理角度對木材力學性質之影響，柳杉試材於木理角度0°之MOE為10 GPa，木理角度為90°之MOE則下降為0.9 GPa，當木理角度達到30°時，強度損失會維持一定。Wang and Weng (1996)試驗木理角度對抗壓強度之結果顯示，木理角度為45°以上之木材抗壓強度並無顯著差異。Gupta and Sinha (2012)探討木理角度對剪力強度之結果顯示，木理角度由0°增加至90°之剪力強度損失率為65.2%，其中木理角度30°至60°之損失率為29%，本試驗之LVL為方向較為均一的材料，四項力學性質隨著木理角度增加而降低，木理角度0°至30°對LVL之MOE影響最為明顯，抗彎性質於木理角度30°時，損失率達到50%以上；抗壓強度和剪力強度分別為木理角度45°和60°以上時，損失率達到50%以上。

### 三、非破壞試驗性質與抗彎性質之預測值與實驗值

聲學性質之非破壞性試驗應用於木質材料之強度評估與檢測已經有許多研究，其中超音波法為快速且簡易的非破壞檢測方式(Wang et

al. 2008, Yang et al. 2008, Ettelaei et al. 2019)，Fig. 5為不同木理角度之DMOE<sub>us</sub>高估比例，由板面超音波傳遞速度所評估之DMOE<sub>us</sub>，其高估比例隨著木理角度增加有先下降再提高的趨勢，平均高估比例為21%至35%，隨著材料厚度增加而有減少的趨勢。Figure 6為不同木理角度之DMOE<sub>ub</sub>高估比例，由端部超音波傳遞速度所評估之DMOE<sub>ub</sub>，其高估比例與板面評估之試驗結果相同，隨著木理角度增加有先下降再提高的趨勢，但是平均高估比例為41%至58%，隨著材料厚度增加而有增加的趨勢。本試驗使用材質穩定且木理方向均一的LVL，利用超音波法進行動彈性模數(DMOE<sub>u</sub>)與抗彎彈性模數(MOE)之相關性如Table 4所示，不論板面或端部之超音波試驗預測值與實驗值具有良好的相關性，決定係數( $R^2$ )分別為0.95和0.97，此外，MOE與MOR之間亦具有高度的相關性(Table 4)，決定係數( $R^2$ )分別為0.92，利用MOE評估材料之抗彎抗壓強度具有一定可靠度，由前述非破壞性試驗應可以有效預測抗彎強度性質與各木理角度之強度。

Table 6為木理角度0°之縱向動彈性模數(DMOE<sub>0</sub>)和木理角度90°之橫向動彈性模數(DMOE<sub>90</sub>)之試驗結果，比較平板振動法與超音波法所得之預測值與實測值差異，平板振動之縱向動彈性模數(DMOE<sub>v0</sub>)高估值為10%，板面超音波之縱向動彈性模數(DMOE<sub>us0</sub>)高估值為30%，端部超音波之縱向動彈性模數(DMOE<sub>ub0</sub>)高估值為48%；橫向抗彎性質預測方面，平板振動之橫向動彈性模數(DMOE<sub>v90</sub>)高估值為67%，板面超音波之橫向動彈性模數(DMOE<sub>us90</sub>)高估值為23%，抗彎超音波之橫向動彈性模數(DMOE<sub>ub90</sub>)高估值為80%，由於LVL為單板纖維方向相同組成，因此橫向抗彎強度較差，其MOE<sub>90</sub>數值較低之結果造成DMOE<sub>90</sub>與MOE<sub>90</sub>之數值差異提高，應用靜態方法所測量的彈性模數受潛變影響程度較大，其動態方法測量之彈性模數低(Cho 2000b)，此外，靜態試驗僅為製材品部分區域之性質，然而動態方法則完全反映缺點之影響，可以應用平板振動試驗為板狀非破壞試驗參考值。

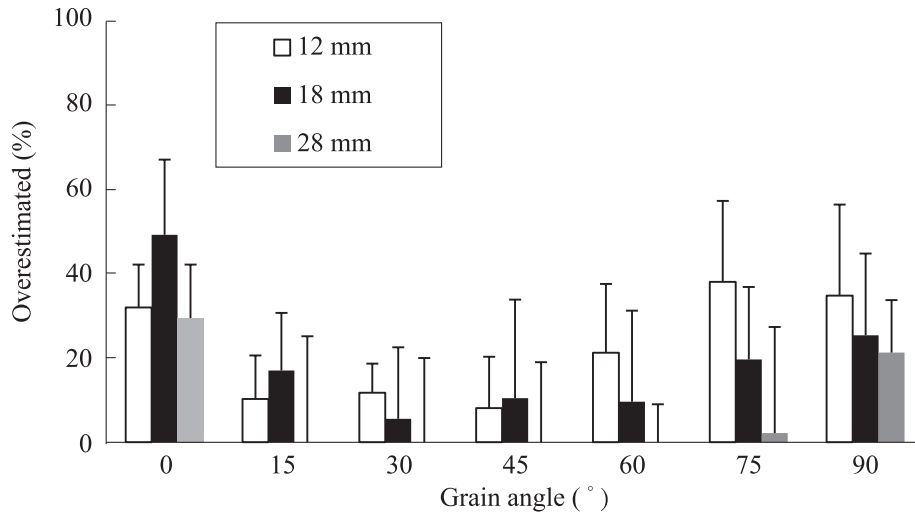


Fig. 5. Overestimated value of the modulus of elasticity (MOE) by the surface ultrasonic dynamic MOE (DMOEus).

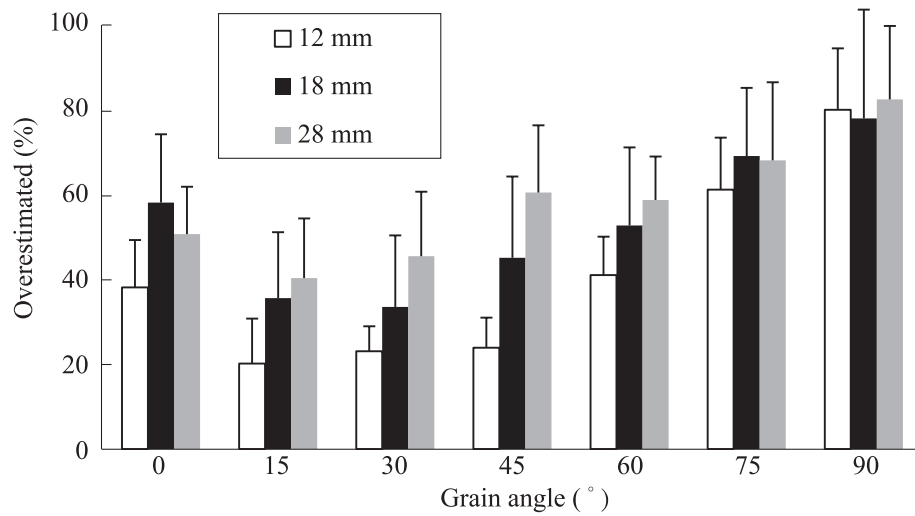


Fig. 6. Overestimated value of the modulus of elasticity (MOE) by the bending ultrasonic dynamic MOE (DMOEub).

#### 四、漢金森方程式評估LVL之抗彎性質

不同木理角度之抗彎性質可使用木理角度 $0^\circ$ 與 $90^\circ$ 之資料，並由漢金森方程式(公式7)進行預測(Hankinson 1921, Holmberg 2000)，然而方程式之指數(n)必須經由不同木理角度推算，本試驗將LVL各木理角度之超音波傳遞速度( $V_\theta$ )、超音波動彈性模數(DMOE $_{u_\theta}$ )和抗彎彈性模數(MOE $_\theta$ )，分別以漢金森方程式進行統計擬合，

利用最小平方法計算各角度誤差值最小之指數(n)如Table 7所示。板面超音波傳遞速度( $V_s$ )計算各厚度之指數值為1.83至2.11，端部超音波傳遞速度( $V_b$ )之指數值則為2.02至2.11，由超音波非破壞評估所得之指數值與一般木質材料之n值2.00相近(Yang et al. 2002, Forest Products Laboratory 2010, Logsdon et al. 2014)。

$$V_\theta = (V_\theta \times V_{90}) / (V_\theta \sin^n \theta + V_{90} \cos^n \theta) \dots\dots\dots (7)$$

**Table 6. Bending properties by the non-destructive test and bending test**

Thickness (mm)	DMOE <sub>0</sub> (GPa)			MOE // (GPa)	DMOE <sub>90</sub> (GPa)			MOE <sub>⊥</sub> (GPa)
	v	us	ub		v	us	ub	
12	9.78 (4.62)	10.79 (5.28)	11.63 (6.57)	8.48 (10.87)	0.84 (7.17)	0.57 (12.33)	0.77 (5.01)	0.43 (9.84)
18	7.11 (10.11)	8.97 (8.10)	9.83 (8.79)	6.28 (14.99)	0.65 (6.36)	0.49 (8.15)	0.72 (13.20)	0.41 (22.21)
28	7.49 (8.95)	8.82 (8.73)	10.95 (10.45)	7.28 (9.92)	0.49 (6.61)	0.39 (12.38)	0.61 (8.53)	0.33 (10.12)

Values in parentheses are coefficients of variation (%).

DMOEv is the dynamic modulus of elasticity by plate vibration testing (v).

DMOEus is the DMOE by ultrasonic wave testing (us) of the laminated veneer lumber (LVL) surface.

DMOEub is the DMOE by ultrasonic wave testing of LVL bending (ub) sample.

MOE // is the longitudinal modulus of elasticity by a static test.

MOE<sub>⊥</sub> is the transverse modulus of elasticity by a static test.

**Table 7. The n value of Hankinson's formula by non-destructive testing (NDT) and bending test**

Thickness	NDT				MOE
	Vs	Vb	DMOEus	DMOEub	
12 mm	2.11	2.02	2.22	2.51	3.04
18 mm	2.02	2.05	2.19	2.52	3.06
28 mm	1.83	2.11	2.30	2.72	2.97

Vs, surface; Vb, bending velocity; DMOEus, DMOE by ultrasonic wave testing of the laminated veneer lumber (LVL) surface; DMOEub, DMOE by ultrasonic wave testing of LVL bending sample; MOE, modulus of elasticity.

然而，利用動彈性模數(DMOE)和抗彎彈性模數(MOE)以漢金森方程式計算三種厚度LVL之指數值則有提高的趨勢，板面超音波動彈性模數(DMOEus)之指數值(n)分別為2.22、2.19和2.30；端部超音波動彈性模數(DMOEub)之指數值為2.51、2.52和2.72；抗彎彈性模數(MOE)指數值分別為3.04、3.06和2.97，本試驗計算之指數值有提高的趨勢，因為LVL去除木質材料大部分缺點，並且木理走向較木材均一之影響。

平板振動所得之非破壞性評估結果較接近實驗值，將非破壞試驗所得之指數值配合平板振動試驗之縱向抗彎強度(DMOEv<sub>0</sub>)與橫向抗彎強度(DMOEv<sub>90</sub>)，獲得各木理角度之平板振動MOE預測值(nDMOEus、nDMOEub、nMOE和nRef)，配合DMOEu與MOE實測值進行比較。三種厚度LVL之MOE預測值與實驗值如Figs. 7

至9所示，三種厚度LVL之nRef和nDMOEus預測值於木理角度0°至45°皆為先低估再高估的趨勢；nMOE預測值與實驗值相近，但是預測值均高於實測值；nDMOEub預測值與趨勢較符合實測值，並且與以上四種預測值之漢金森指數平均值2.58相近，因此，PVT試驗結果使用較符合實測值之漢金森指數2.58計算各木理角度之預測值(DMOE)，其預測值與實測值(MOE)之相關性如Fig. 10所示，各木理角度之DMOE與MOE之間具良好的相關性，其決定係數(R<sup>2</sup>)為0.97，LVL之DMOE預測值分別高於MOE，厚度12、18和28 mm之LVL分別高估27%、19%和5%，使用平板振動法試驗之縱向與橫向DMOEv配合漢金森公式之評估方式，可以有效預測不同木理方向之抗彎強度，以全板振動之評估方式可以獲得接近實際試驗結果之抗彎彈性模數預測值。

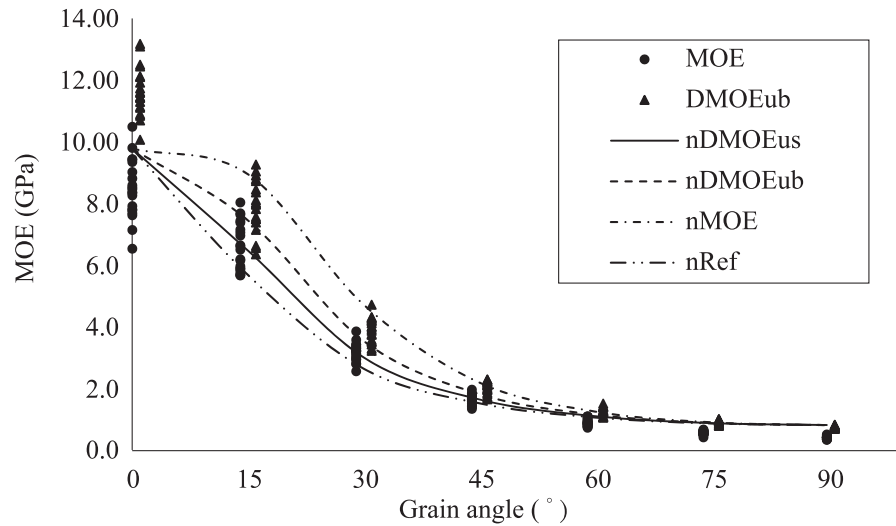


Fig. 7. Relationship between Hankinson's formula and the grain angle (thickness 12 mm laminated veneer lumber (LVL)). The modulus of elasticity (MOE) and bending ultrasonic dynamic MOE (DMOEub) (GPa) are experimental values; nDMOEus, nDMOEub, nMOE and nRef are predicted values by Hankinson's formula.

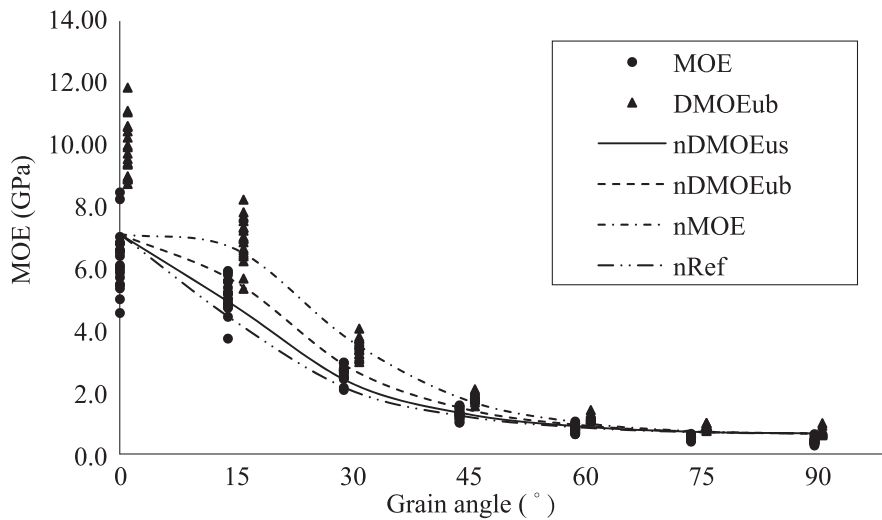
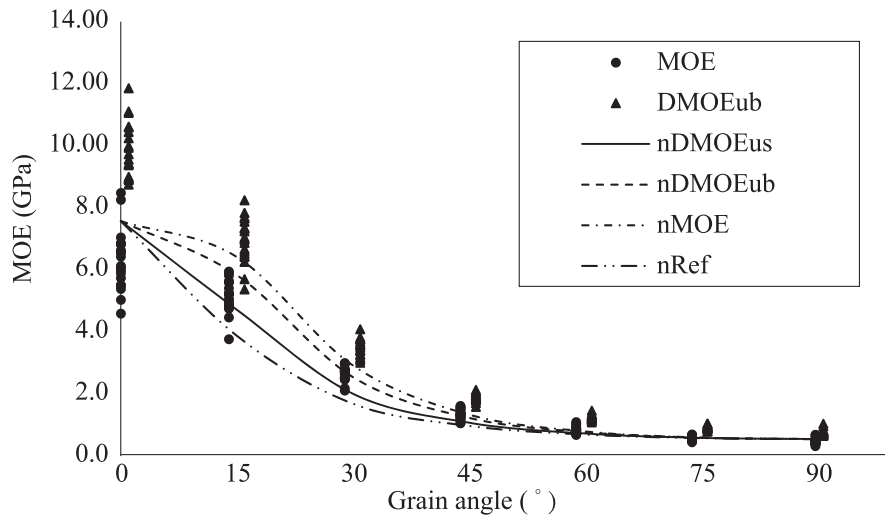


Fig. 8. Relationship between Hankinson's formula and the grain angle (thickness 18 mm of laminated veneer lumber (LVL)). The modulus of elasticity (MOE) and bending ultrasonic dynamic MOE (DMOEub) (GPa) are experimental values; nDMOEus, nDMOEub, nMOE and nRef are predicted values by Hankinson's formula.

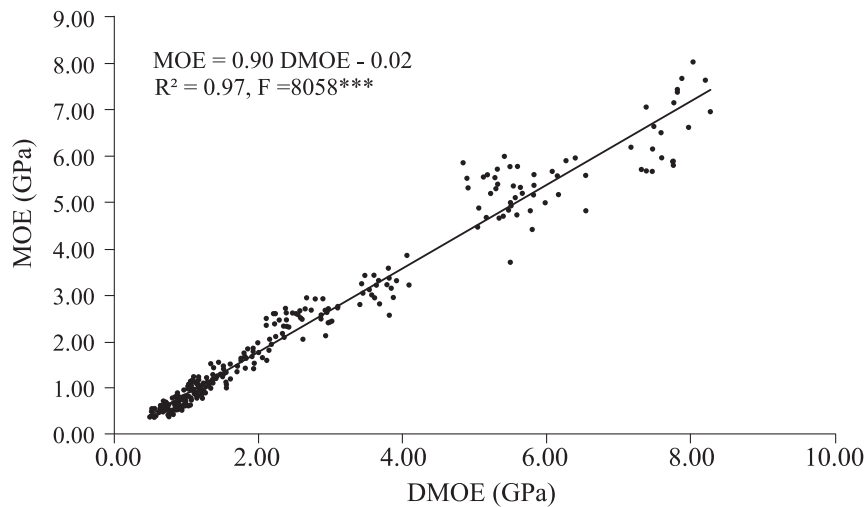
## 結論

本研究以非破壞性試驗評估木理角度對LVL性質之影響，當木理角度達到30°時，超音波傳遞

速度之數值將損失50%以上，LVL之抗彎性質、抗壓強度和剪力強度分別於木理角度達到30°、45°和60°時，各項強度損失率開始高於50%。由超音波試驗結果顯示板面超音波速與抗彎試



**Fig. 9. Relationship between Hankinson’s formula and the grain angle (thickness 28 mm of laminated veneer lumber (LVL)). The modulus of elasticity (MOE) and bending ultrasonic dynamic MOE (DMOEub) (GPa) are experimental values; nDMOEus, nDMOEub, nMOE and nRef are predicted values by Hankinson’s formula.**



**Fig. 10. Relationship between the dynamic modulus of elasticity (DMOE) (n = 2.58) and MOE. ( $p < 0.001$ )**

材超音波速相近，其計算之超音波動彈性模數 (DMOEu)與抗彎彈性模數(MOE)具有良好的相關性，但是預測值與實測值之高估值較大，本試驗使用PVT進行更全面之非破壞性評估，配合漢金森方程式與LVL指數2.58計算之抗彎彈性模數預測值與實測值相關性良好，其決定係數為 0.97。

引用文獻

**Brown HP, Panshin AJ, Forsaith CC. 1952.** Textbook of wood technology Vol II. p.127-54.  
**Chen BJ, Wang SY. 1999.** The relationship between the degree of flake alignment and

- sound velocity of China fir OSB. For Prod Ind 18(3):269-78. [in Chinese].
- Cho CL. 2000a.** Vibrational properties of oriented strand board. Q J Chin For 33(4):549-58. [in Chinese].
- Cho CL. 2000b.** Measurement of modulus of elasticity and shear modulus of structural lumber using complex vibration method. For Prod Ind 29(4):227-36. [in Chinese].
- CNS 2013.** Chinese National Standards (CNS) CNS 453 (2013) Wood—Determination of compression properties. Bureau of Standards. Taipei, Taiwan: Bureau of Standards, Metrology and Inspection (BSMI), Ministry of Economic Affairs, R.O.C.
- CNS 2013.** Chinese National Standards (CNS) CNS 454 (2013) Wood—Determination of static bending properties. Bureau of Standards. Taipei, Taiwan: Bureau of Standards, Metrology and Inspection (BSMI), Ministry of Economic Affairs, R.O.C.
- CNS 2013.** Chinese National Standards (CNS) CNS 455 (2013) Wood—Determination of ultimate shearing stress parallel to grain. Bureau of Standards. Taipei, Taiwan: Bureau of Standards, Metrology and Inspection (BSMI), Ministry of Economic Affairs, R.O.C.
- Ettelaei A, Layeghi M, Zarea Hossenabadi H, Ebrahimi G. 2019.** Prediction of modulus of elasticity of poplar wood using ultrasonic technique by applying empirical correction factors. Measurement 135:392-9.
- Fathi H, Nasir V, Kazemirad S. 2020.** Prediction of the mechanical properties of wood using guided wave propagation and machine learning. Construct Build Mater 262:120848.
- Forest Products Laboratory. 2010.** Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Chapter 5. p 1-46.
- Gupta R, Sinha A. 2012.** Effect of grain angle on shear strength of Douglas-fir wood. Holz-forschung 66:655-8.
- Hankinson RL. 1921.** Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. Air Force Inform Circ 3:259.
- Holmberg H. 2000.** Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). HolzalsRoh Werkstoff 58:91-5.
- Huang YS, Chen SS. 1997.** Effect of grain angle and moisture content on acoustic properties of wood for musical instruments. Taiwan J For Sci 12(3):355-61. [in Chinese].
- Kawahara K, Ando K, Taniguchi Y. 2015.** Time dependence of Poisson's effect in wood. IV: influence of grain angle. J Wood Sci 61:372-83.
- Logsdon NB, Finger Z, Henrique de Jesus JM. 2014.** Influência do ângulo entre a força e as fibras da madeira na resistência à tração. Adv For Sci Cuiabá 1(3):95-100.
- Wang SY, Weng LH. 1996.** Effects of grain angle on the compressive strength, hardness and sandblasting properties of five wood species. For Prod Ind 15(4):547-73. [in Chinese].
- Wang SY, Chen JH, Tsai MJ, Lin CJ, Yang TH. 2008.** Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. J Mater Process Technol 208(1):149-58.
- Yang TH, Chen BJ, Wang SY. 2002.** Properties of light weight oriented strand board made from PF-resin impregnated flakes. For Prod Ind 21(1):39-50. [in Chinese].
- Yang TH, Wang SY, Lin CJ, Tsai MJ. 2008.** Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. Construct Build Mater 22:487-93.