

木材非破壞檢測技術公式及單位之正確用法淺論

黃彥三^{1,2)}

摘 要

非破壞或微破壞的技術被廣泛運用在檢測木質材料的密度、強度、音速及動彈性係數等，但由目前國內外所發表的文獻中，得知有許多研究者有誤用公式與單位的情況。因此，本文就縱振動、橫振動及扭曲振動的測試方法及計算公式作簡要介紹，並以實例來說明木材非破壞檢測計算公式及單位之正確使用。透過本文釐清與討論誤用與混淆的發生案例，使學界日後能正確使用相關的公式，也避免繼續誤用錯誤公式。

關鍵詞：木材、非破壞檢測、公式、單位。

黃彥三。2021。木材非破壞檢測技術公式及單位之正確用法淺論。台灣林業科學36(2):161-70。

¹⁾ 林業試驗所退休研究員，10066臺北市南海路53號 Retired Researcher, Taiwan Forestry Research Institute. 53 Nanhai Rd., Taipei 100, Taiwan.

²⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail:yansanhuang@ntu.edu.tw

2021年1月送審 2021年6月通過 Received January 2021, Accepted June 2021.

Review article

Simple Viewpoints on the Method of Timber Non-destructive Testing and the Correct Use of Formula and Unit

Yan-San Huang

【 Summary 】

Non-destructive or micro-destructive techniques are widely used to detect the density, strength, sound speed and dynamic elasticity of woody materials. In this paper, the methods and equations of measuring the longitudinal, transverse and torsional vibration modulus of wood are briefly illustrated. Many authors have misused formulas and units from the published literature survey. Therefore, the purpose of this paper is to illustrate the correct use of wood non-destructive testing formulas and units. By clarifying and discussing the cases of misuse and substitution here, the academic community can use the relevant formulas correctly in the future, and can also avoid continuing to misuse the wrong formulas.

Key words: Wood, Non-destructive techniques, Formula, Unit.

Huang YS. 2021. Simple viewpoints on the method of timber non-destructive testing and the correct use of formula and unit. Taiwan J For Sci 36(2):161-70.

前言

非破壞檢測技術係利用非破壞或微破壞技術來檢測材料的物理性質，近年來更是常被用來檢測木質材料的音速及動彈性係數(E_d)，藉此評估實木(包括樹幹)內部之材質，腐朽或中空狀態。非破壞檢測中，又以動彈性係數的測定最為重要，其測定方法主要是利用「打音」，超音波或應力波測定儀來測得聲波在木材中的音速 V ，然後再利用木材質量密度 ρ 計算出動彈性係數。這個分析技術在物理學上的原理非常簡單，在大一的普通物理學的教科書中即有清楚說明，如Sears & Zemansky (1952)的「大學物理學(College Physics)」所講述：

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \dots\dots\dots(1)$$

$$E_d = V^2 \rho \dots\dots\dots(2)$$

我們都知道，在討論力學問題時，「單位」是最重要的標準，以CGS公分-公克-秒制單位(Centimeter-gram-second system of

units)系統而言，其中 V 為cm/s， ρ 為g/cm³， E_d 則為dyne/cm²；而MKS公尺-公斤-秒制單位(Meter-kilogram-second system units)系統時， V 為m/s， ρ 為kg/m³， E_d 則為N/m²。其中， V 在縱向打音上係以 $2Lfr$ 表示(fr 為基本共振頻率Hz，目前可利用傅利葉高速頻譜分析儀FFT快速測得， L 為試材長度)，但在利用超音波或應力波測定儀時，則是以距離為 L 兩點間之音波穿透時間 T 之比值 L/T 來求得。除了CGS單位系統外，於1954年第10屆國際度量衡總會(General Conference of Weights and Measures, CGPM)擴大單位系統，將MKS加入而成為國際單位系統(Système International d'Unités)，簡稱SI制，英文則為International System of Units。在此系統中質量採用kg，長度為m，而時間則為s。在此制度下，其衍生單位力量為N (kgm/s²)，應力為Pa (N/m²)、kPa (10³ Pa)、MPa (10⁶ Pa)和GPa (10⁹ Pa)等。在上述公式中的動彈性係數 E_d 的單

位在SI單位為Pa。事實上，目前國際上的專業學術期刊，在稿約上也大都明訂論文中公式與數據應採用SI制。

雖然如此，尤其在美國的業界，工程界或早期的參考書常採用英制(inch-pound)單位，例如Timoshenko & Young (1955)在振動工學中動彈性係數以下式(3)表示

$$E_d = V^2 \gamma / g \dots\dots\dots(3)$$

上式中 γ 為重量密度，單位為 lb/in^3 ， g 為重力加速度(386 in/s^2)， V 之單位為 in/s ，而 E_d 之單位則為 lb/in^2 。簡言之，採用重量密度時需除以 g 。其理由來自物理學上質量(m)與重量(w)之基本關係 $m = w/g$ 。

當在推導物理學公式時，最重要的其本法則是公式等號左右兩側的單位必須對等，且質量與長度的單位也必須相對應，即長度若用 m 時，質量需用 kg 。現以上述公式(2)為例，等號左側動彈性係數 E_d 為應力單位，故等號右側亦必需為應力單位，現就右側單位組合成 $(\text{m/s})^2 (\text{kg/m}^3) = (\text{kg} \cdot \text{m/s}^2) / \text{m}^2 = \text{N/m}^2$ ，此即應力Pa，故左側 E_d 之單位亦必需為Pa。但因Pa的位數常很多，故常換算成kPa、MPa或GPa來表示。若欲利用工程單位 kgf/cm^2 來表示時，可利用 $1\text{MPa} = 10.2 \text{ kgf/cm}^2$ 的關係來換算。故藉上述(2)式直接計算 $E_d (\text{kgf/cm}^2)$ 是不可行的，今以 $V = 4500 \text{ m/s}$ 、 $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ 為例，以公式(2)計算得 $E_d = 8100 \text{ MPa}$ ，並可換算成 82620 kgf/cm^2 。

1.非破壞試驗法木材動彈性係數之測定概述

筆者在文中謹試就利用非破壞檢測技術測定木材動彈性係數時較常採用的技術及其計算公式加以闡述，提供正確的計算公式供讀者參考。希望有助於往後的試驗研究，減少錯誤的發生。以下謹參考Timoshenko & Young、Bodig & Jayne (1982)，就縱振動，橫振動及扭曲振動試驗加以簡要的說明。

2.1縱振動測試法

(1)超音波法(Ultrasonic testing method)

如圖1所示在試材兩端分別設置兩個壓電式變換器，一端為發射端，另一端為收信端。將

由超音波發生儀所產生的信號從發射端發射，超音波經由試材傳遞至收信端所需時間(T)可顯示在超音波發生儀上。將試材長度(L)除以T便是超音波在試材中的速度V。依上述公式(2)便可計算出試材縱向的動彈性係數 E_d 。參考相關文獻Vázquez et al (2015)係利用超音波測試木材之動彈性係數，並與靜力壓縮及彎曲彈性係數作比較，可供讀者參考。Gonçalves et al (2019)係利用超音波就七樹種之枝條，在生材狀態下，藉多面體試片利用縱波及剪力波變換器就不同纖維及年輪方向測定木材的十二種基本彈性係數，含縱向彈性係數(E_L 、 E_T 、 E_R)，剪斷彈性係數(G_{LT} 、 G_{LR} 、 G_{RT})及包松比(V_{LT} 、 V_{TL} 、 V_{RT} 、 V_{TR} 、 V_{LR} 、 V_{RL})，可說是超音波測試技術的高度應用。另外文獻Bucur (2006)為有關木材音響的重要參考書，該書中對超音波及振動的理論及測定技術有詳盡且深入的描述，讀者可藉以參考。

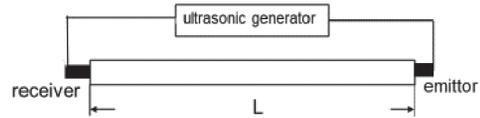


Fig. 1. Ultrasonic testing method

(2)應力波測試法(Stress wave testing method)

如圖2所示在試材上距離為L的兩點上設置兩個壓電式變換器，一端為應力波信號發射端，另一端為接收端，利用木槌輕敲發射端，則應力波在兩端子間的傳遞時間T便可在應力波儀上顯示出來，再依超音波測試的同樣方法，便可計算出動彈性係數。文獻Smulski (1991)、Halabe et al (1997)、Gray et al (2008)係利用應力波之測試研究可資參考。此外亦有在距離L的兩端上裝置加速度變換器，在材端以木槌輕擊，在示波器上測定縱波在兩加速度計間之傳遞時間差(T)，藉以計算音速及動彈性係數。

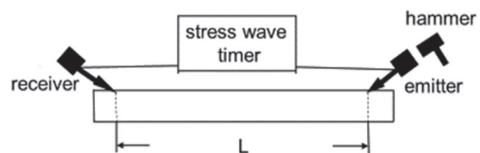


Fig. 2. Stress wave testing method.

(3)打音法(tap tone)

往昔因電子儀器較不發達，以縱振動方式測定動彈性係數的研究甚為少見，以打音方式測定 E_d 可說是在頻譜分析儀FFT問世(1967)以後的事。如圖3所示，將細長試片在中心點作支持，一端前方放置麥克風並將由另一端以橡皮槌或木槌輕敲時所產生的打擊音之信號輸入FFT分析儀，在頻譜上測出試材之縱振動共振頻率 fr ，由下式(4) 計算出動彈性係數。

$$E_d = \frac{4fr_n^2 L^2 \rho}{n^2} \dots\dots\dots(4)$$

上式中 n 為共振次數1、2、3.....，亦即各振態之共振頻率係成簡單的整數倍。即 $fr_2/fr_1 = 2$ 、 $fr_3/fr_1 = 3$，因包松比效應及FFT儀器之解釋度及木材材質不均勻的問題，實際測得之各次共振動頻率並非恰成整數倍，通常會有少許之差異。實用上一般均以基本共振頻率 fr_1 ($n = 1$)來計算。圖3之中心點為基本共振之節點，振動試驗時均將試材之支持點設在振動波之節點，藉以避免支持點對共振頻率產生拘束作用。但由於縱振動時並無垂直方向之位移，故實用上支持點之位置對共振頻率之測定並無顯著影響，在現場時即使將木槌平放地面上，在實驗室時用手握試片之中央亦能測出相當準確的共振頻率。一般言之，打音所測得 E_d 較靜曲彈性係數約大5~10%。木材之縱向打音技術係由日本名古屋大學的Sobue 於1985年首度發表(Soube 1985)，筆者在指導下於翌年將此技術引進台灣(Huang 1986)。

2.2 橫振動測試法

本文主要參考Timoshenko 的樑振動理論

(1)兩端簡單支持樑(simple support) 之測試法

係在試片兩端以簡單支持方式，如圖4所示，其橫振動之測試方法在早期FFT尚未問世前，多採用強制振動法，利用電磁發振器，使試材發生橫振動，再利用頻率掃描儀透過示波器測出振幅最大之頻率作為試材之基本共振頻率。目前FFT應用普及，在試片近中央上方以橡皮槌或木槌加以輕敲，並利用麥克風將試材橫振動信號輸入FFT進行頻譜分析，測出共振頻率 fr ，今以矩形斷面為例，可以下式(5)計算動彈性係數。

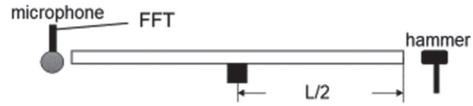


Fig. 3. Longitudinal vibration testing by tap tone.

$$E_d = \frac{48fr_n^2 L^4 \rho}{n^4 \pi^2 h^2} \dots\dots\dots(5)$$

上式中 h 為試片厚度， n 為共振次數1、2、3.....

一般利用基本共振 $n = 1$ 時之 fr_1 來計算。兩端簡單支持樑之振態，其基本共振 $n = 1$ 時之波腹在中央，故欲測試基本共振頻率時木槌之打擊位置要接近樑之中央。由上式(5)可知 $fr_2/fr_1 = 4$ 、 $fr_3/fr_1 = 9$ 、 $fr_4/fr_1 = 16$，但實際測定時常有數個百分點之誤差。Murphy (1997, 2011)曾就兩端簡單支持樑之支點外伸長度之不同對共振頻率之影響提出修正公式，這在實際應用上是頗值得參考的。

(2)兩端自由樑之測試法(Transverse vibration testing of free-free beam)

測試基本共振頻率時，係在距兩端0.224L，即 $n = 1$ 之節點，以硬材上加橡皮或軟質聚苯乙烯作為襯墊，作為支點(圖5)，此時以橡皮槌或木槌在材端或中央作橫向敲擊，由置於試材另一端的麥克風將試材自由橫振動信號輸入FFT進行頻譜分析，測定基本共振頻率 fr_1 。今以矩形斷面為例，可利用下式(6)計算動彈性係數。

$$E_d = \frac{48\pi^2 L^4 fr_n^2 \rho}{m_n^4 h^2} \dots\dots\dots(6)$$

$$m_1 = 4.730、m_2 = 7.853、m_3 = 10.996、m_4 = 14.137\dots m_n \approx 0.5 \pi (2n+1) (n > 2)$$

$$fr_2/fr_1 = (m_2/m_1)^2 = 2.76、fr_3/fr_1 = (m_3/m_1)^2 =$$

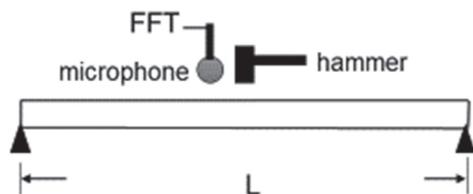


Fig. 4. Transverse vibration testing of simply supported beam.

$$5.40 \cdot fr_4/fr_1 = (m_4/m_1)^2 = 8.93$$

Hearmon 早在1958年便利用強制振動法進行兩端自由樑橫振動研究，並發表回轉慣性(rotary inertia)及剪斷應力對共振頻率之效應之理論式，利用最小二乘法測出真動彈性係數及動剪斷彈性係數 G_d 。進行兩端自由橫振動試驗時係在1~4次共振之節點，即距兩端分別為0.224L、0.132L、0.094L及0.073L位置以細線上吊法支持試片，其測試結果顯示對於基本共振頻率之測定，支持點之精確設定較重要，但對於高於4次共振時支持點之設定影響較小，氏所發表之論文至今仍為後世研究者之典範。Sobue (1986)更藉Hearmon的理論以FFT分析儀利用木樑的兩端自由橫振動快速測定動彈性係數，並以最小二乘法推算動剪斷彈性係數。Haiens et al (1996)則利用FFT分析儀就雲杉 (spruce)、冷杉(fir)及均質材料進行縱向打音，兩端自由橫振動及超音波測試，就測得之動彈性係數與靜曲彈性係數作比較。

(3) 肱樑之橫振動測試(Transverse vibration testing of cantilever beam)

肱樑之橫振動試驗如圖6所示，將試材一端加以固定，但固定方式及固定力大小對測得的共振頻率有影響，通常要以一定的扭力來鎖定木端，在樑末端以木槌輕敲使產生自由振動，同時用麥克風將信號輸入FFT，作頻譜分析確定其基本共振頻率，再依下式(7)計算試材之動彈性係數。利用各次共振頻率比的關係，可推測正確的基本共振頻率。

$$E_d = \frac{48\pi^2 L^4 fr_n^2 \rho}{a_n^4 h^2} \dots \dots \dots (7)$$

$$a_1 = 1.875 \cdot a_2 = 4.694 \cdot a_3 = 7.855 \cdot a_4 = 10.996 \dots \dots \cos a_n \cosh a_n = -1$$



Fig. 5. Transverse vibration testing of free-free beam.

$$fr_2/fr_1 = 6.267 \cdot fr_3/fr_1 = 17.55 \cdot fr_4/fr_1 = 34.39 \dots \dots$$

以肱樑作為橫振動試驗的研究較為少見，讀者可參閱文獻(Hunt et al 2013)。

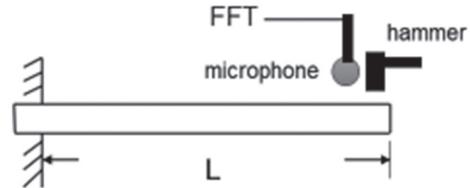


Fig. 6. Transverse vibration testing of cantilever beam.

2.3 扭曲振動測試法(Torsional vibration testing method)

扭曲振動公式的誘導過程與縱振動相似，但若斷面非圓形時則較複雜。且若像木材之直交異方性材料則更進一步複雜化(Nakao et al 1985)、(Roohnia & Kohantorabi 2015)。動剪斷彈性係數 G_{LR} 與共振頻率之關係如下式(8)所示

$$G_{LR} = \left(\frac{2Lfr_n}{n}\right)^2 \frac{\rho I_p}{kbh^3} \dots \dots \dots (8)$$

$$I_p = \frac{bh}{12} (b^2 + h^2)$$

上式中 I_p 為試材斷面之極慣性矩(polar moment of inertia)， k 係數如表1所示(Bodig & Jayne)， k 值除與試材之寬、厚比 b/h 有關外尚與 (G_{LT}/G_{LR}) 之比值有關， k 之計算公式較為複雜，其公式(9)係參照文獻Nakao et al列於下供研究者參考(圖7參照)

$$k = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{h}{b} \sqrt{\frac{G_{LR}}{G_{LT}}} \times \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi b}{2h} \sqrt{\frac{G_{LT}}{G_{LR}}} \right) \dots \dots \dots (9)$$

因木材剪斷彈性係數在工程上較少應用，且因 G_{LR} 與 G_{LT} 之值相當接近，故在實用上可將木材在斷面內視為均質材料，即以 $G_{LR} = G_{LT} = G_L$ 看待。此時公式(8)之 G_{LR} 則換成 G_L 。表1中之 G_{LT}/G_{LR} 可簡化為1，若斷面為正方形($b = h$)則 $k = 0.141$ ，餘類推。但厚度與寬度若為不定值則仍須利用公式(9)來計算。扭曲共振頻率的測試

方法參照ASTM C1548 (2012)如圖7所示，寬面為徑面，基本共振的節線在試材長度的中央及寬度的中心線上(十字虛線)，故要將支持點設在節線上。測試時在材端角落以槌輕擊，同時在另一端角落用麥克風或加速度計，將信號輸入FFT測定共振頻率，各次數共振頻率與基本共振頻率之比值與打音縱振動相同，均為1、2、3.....之簡單整數。圖7在理論上可同時測得奇數次數的共振頻率，若在硬塊支持物與試材間放置橡皮或聚苯乙烯之類軟墊，減少支點之拘束作用，則可同時測得偶數次數的共振頻率。Roohnia & Kohantorabi曾利用此方法進行扭曲振動試驗測定 G_d 並與利用兩端自由樑橫振動方法測得之 G_d (Hearmon)相比較，結果顯示兩者有一致的關係。Bodig & Jayne認為扭曲振動試驗之試片，寬度應大於厚度的4倍才能測得準確的 G_{LR} 。Sobue (1988)曾研發利用彎曲與扭曲複合振動技術同時測定動彈性係數及動剪斷彈性係數。作者在試材一端左右兩角落放置麥克風或加速度計，從另一端的角落以槌輕敲，利用FFT分析儀將同時發生的彎曲與扭曲信號，加以加減算術運算，如此可將彎曲與扭曲共振頻率加以分離。

因橫振動與扭曲振動測試時理論上應將支持點設在振波的共同節點上，故支持點係設在試材長度的中央，並將圖7寬面中央($b/2$)位置之支持點移除，因 $L/2$ 支持點為扭曲基本共振($n = 1$)及彎曲二次共振($n = 2$)的共同節點，故此時學理上只能測得扭曲一次共振以上及彎曲二次以上的共振頻率，而試驗結果亦確認此一推論。此時彎曲 E_d 之計算就應採用本文公式(6)中係數 $m_2 = 7.853$ 者。日本木構造木材強度試驗手冊(Strength Testing Manual of Structural Timber 2011)也明定支持點要設在試材中央，並認定試材須為板狀($b \gg h$)，且採用二次共振來計算 E_d 。另一方面Cho (2007)係參考Sobue之彎曲與扭曲複合振動分析技術進行同時測定動彈性係數及動剪斷彈性係數之研究，惟該論文中圖2之複合振動測定法係將支持點放在兩端自由彎曲橫振動之基本共振之節點，即距材端 $0.224L$ 之位置，而非上述試材中央。換言之，係完全未考慮到扭曲共振之節點，在此狀態下似乎只能準確測定動彈性

係數，但在扭曲振動共振頻率之測定上卻完全沒有節點被支持，此一測定模式顯然不符合振動測定原理，且無文獻佐証，在此狀態下測得之扭曲基本共振頻率是否與由圖7方式測得者完全一致，不無疑問，因位於 $0.224L$ 支持點的拘束作用應會影響到扭曲基本共振頻率。共振頻率之測定若與支持點之位置無關，則該論文圖2之測定模式便不需要將支持點放在 $0.224L$ 之位置。因扭曲振動與彎曲振動是對等的，複合振動測試應符合合理的測定方法論(methodology)。

Table 1. k values of equation (8)

$\frac{b}{h} \left(\frac{G_{LT}}{G_{LR}} \right)^{0.5}$	k	$\frac{b}{h} \left(\frac{G_{LT}}{G_{LR}} \right)^{0.5}$	k
1.0	0.141	3.0	0.263
1.25	0.172	4.0	0.281
1.5	0.196	10.0	0.312
1.75	0.214	20.0	0.323
2.0	0.229	∞	0.333

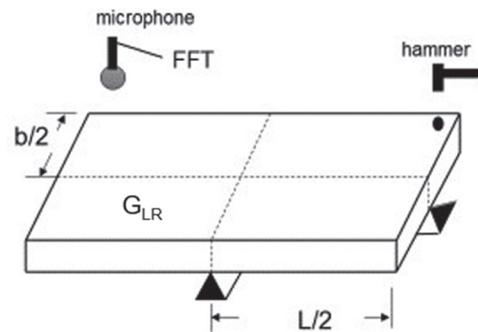


Fig. 7. Torsional vibration testing method (ASTM C1548).

2 相關問題之討論

於研讀林產研究者所發表有關木材非破壞檢測動彈性係數之論文時，發現有許多計算公式或單位的推導與使用常發生錯誤。因此，若不清楚運算與勘誤，恐對國內外學術界、後學及業界造成誤導。在此前提下，筆者是以拋磚引玉的情懷，用一些實例就教於研究者，若能藉此導正觀念則幸甚。首先以四篇文獻 Wang et al (2002)、Chiu et al (2000)、Chen et al

(2010)、Lin et al (2000)為例，於這幾篇研究中所提出的動彈性係數皆以下述公式(10)表示

$$E_d = \frac{V^2 \rho}{g} \dots\dots\dots(10)$$

式中g為重力加速度，在SI單位中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，在CGS單位中 $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 。與前述公式(2)相較，最大不同是將質量密度 ρ 除以 g ，這在學理上是完全不正確的。我們更進一步檢視上述(10)式分式之分子依公式(2)即為應力單位，若再除以分母 g （單位為 m/s^2 或 cm/s^2 ），則等號右側分式之單位便不再是應力，無法與左側 E_d 之應力單位相對等，由此亦可知公式(10)是個不合理的錯誤公式。至於單位錯用的問題就不再作討論。現以文獻Chen et al為例，依上述公式(10)以 $V = 4500 \text{ m/s}$ 、 $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 之數據計算得 $E_d = 826530612 \text{ (kgf/cm}^2)$ ，公式右側非此單位，數字比公式(2)之計算結果大了一萬倍，當然是完全錯誤的計算結果。至於文獻Lee (2009)則是公式正確但使用單位錯誤，造成計算結果較正確值大100倍的錯誤結果。另Dong et al. (1994)以加速度計置於中密度纖維板及粒片板試片兩端，以敲擊法測定應力波傳遞速度，並利公式(2)計算動彈性係數，公式雖然正確，但他們將式中的質量密度 ρ 定義為比重，在CGS系統中密度的單位是 g/cm^3 ，但比重是無單位的相同純數字，雖然計算結果數值相同，但單位完全不同，所得單位是速度的平方而非應力，在物理學上是完全錯誤的，若是採用EI系統則木材之 ρ 單位為數百 kg/m^3 ，但比重依然是小於1的數字，計算結果數值會差1000倍，且單位當然不同，不可不察。

以上是討論縱向打音，超音波及應力波法測定動彈性係數的實例，若以橫振動法測定 E_d 之情況，同樣發生了錯誤的計算結果，以文獻Lin et al (2007)為例，試片兩端簡單支持時之 E_d 以下式(11)表示

$$E_d = \frac{fr^2 \times W \times L^3}{2.46 \times I \times g} \dots\dots\dots(11)$$

文獻Lin et al中單位作如下表示： fr 為基本共振

頻率(Hz)、 W 為試材重量(g)、 L 是跨距(cm)、 I 是斷面慣性矩(cm^4)、 g 是重力加速度(9.8 m/s^2)。以上公式雖是正確的，但單位使用卻是嚴重錯誤，試材重量 W 用g (克)表示，但「克」是質量非重量，重量與質量當然不可以混用，同樣的謬誤還有長度單位，公尺(m)及公分(cm)也是不可混用的，如此單位不合運算原理，所求得的 E_d 值當然是錯誤的。正確的使用單位應為 fr (Hz)、 W (N)、 L (m)、 I (m^4)、 g (9.8 m/s^2)及 E_d (N/m^2 ; Pa)。(11)式與上述(5)式其實完全相同，因工程上常將木材密度換算成試材重量 W ，並利用基本共振 $n = 1$ 來計算動彈性係數，故將 $W/g = \rho bhL$ 及矩形斷面之 $I = bh^3/12$ 之關係代入(11)式，便成為 $n = 1$ 之公式(5)。再舉一個例子，下述公式(12)是文獻Wang et al (2008)、Yang et al (2008)中述及兩端簡單支持橫振動法測定 E_d 所使用的公式。

$$E_d = \frac{fr^2 WL^3}{6.63 \times I} \dots\dots\dots(12)$$

上述(12)式中的 fr 為基本共振頻率(Hz)、 W 為試材重量、 L 是跨距、 I 則是斷面慣性矩。事實上，這樣的公式是錯誤的透導。正確公式應如上述公式(11)。如再看文獻Yang et al (2016)，在這篇文獻中的(11)式及(12)式，等號左側應都是MPa (N/mm^2)單位，但(11)式的單位為何變成GPa呢？在論文中作者並未交代。再看文獻Tsai et al (2007)，在這篇報告中作者利用超音波檢測 E_d 的公式為本文所述的錯誤公式(10)，即將 ρ 除以 g ，但以縱向打音法檢測 E_d 時則採用本文公式(4)， ρ 並未除以 g ，同一個研究論文怎會用不一樣的公式呢？此外 E_d 的單位都是 kgf/cm^2 ，這當然是錯誤的，因公式中的參數單位均採用EI系統，動彈性係數之單位自然應採用Pa或 N/m^2 ，若欲使用工程單位 kgf/cm^2 則需另作換算。更另人不解的是，兩端簡單支持橫振動法測定 E_d 時，竟然使用英制(inch-pound unit)公式如下

$$E_d = \frac{fr^2 WL^3}{79.5bh^3} \dots\dots\dots(13)$$

公式(13)使用79.5常數，此係將本文公式(11)

中之 I 以 $bh^3/12$ 及 g 以 386 in/s 代入所得，可證明上式(13)為英制公式，式中試片重量 W 之單位應為pound、長度 L 、寬度 b 及厚度 h 之單位均應為inch，計算所得 E_d 之單位應為 lb/in^2 。但作者在整篇報告中的公式與數據都採用公制，居然有一條公式使用英制單位來計算，且未作註明。故公式(13)當然應被視同公制來看待，這將造成試驗所得數據全盤錯誤。故像文獻 Tsai et al 這樣的學術論文無疑是會誤導讀者的。最後要提的是文獻 Yang et al (2007) 使用本文公式(8)來計算動剪斷彈性係數 G ，但公式中試材斷面之極慣性矩 I_p (polar moment of inertia) 卻寫成慣性矩 I ，且論文中亦以慣性矩(moment of inertia) 作定義，因兩者定義完全不同， $I_p = (bh^3 + b^3h)/12$ ， $I = bh^3/12$ ，計算結果相差數倍，不可不察。

正確的報導實驗方法及研究結果，是每一個從事研究工作的人應該遵守的學術倫理，也是每一個研究人員都應該有的認知。如果發表如上述系列的錯誤引用、推導公式所撰寫的論文，極可能會灌輸年輕後進錯誤的專業知識，誤導他們的研究態度，此實為吾輩應該注意與彼此提醒的。

參考文獻

- ASTM C1548. 2012.** Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio of refractory materials by impulse excitation of vibration. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- Bodig J, Jayne BA. 1982.** Mechanics of Wood and Wood Composites. New York, NY: Van Nostrand Reinhold.
- Bucur V. 2006.** Acoustics of Wood. Springer science & business media, 383 Berlin 24.
- Chen JH, Chiu CM, Lin CJ, Yang TH, Wang SY. 2010.** Non-destructive test on the properties of Japanese cedar standing tree growing in the even-age stand. Wood Product Industry 29(4): 217-226.
- Chiu CM, Wang SY, Lin CJ. 2000.** Effect of density of *Taiwania* plantation wood on ultrasonic velocity and dynamic Young's modulus. Q. Jour Chin For. 33(4) 585-590.
- Cho CL. 2007.** Comparison of three methods for determining Young's modulus of wood. Taiwan J For Sci. 22(3): 297-306.
- Dong Y, Nakao T, Tanaka C, Takahashi A, Nishino Y. 1994.** Effects of the shear, compression values of loading points, and bending speeds on Young's moduli in the bending of wood based panels (in Japanese). Mokuzai Gakkaishi 40: 481-490.
- Gonçalves R, Garcia GHL, Brazolin S, Bertoldo C, Ruy M. 2019.** Methodology for the characterization of elastic constants of wood from tree branches. Bioresources 14(4):8439-8454.
- Gray JD, Grushecky ST, Armstrong JP. 2008.** Stress wave velocity and dynamic modulus of elasticity of yellow-poplar ranging from 100 to 10 percent moisture content. Proceedings of the 16th Central Hardwoods Forest Conference. Purdue University, West Lafayette, IN. 139-142.
- Haiens DW, Leban JM, Herbe C. 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 method. Wood Sci. Technol. 30(4):253-63.
- Halabe UB, Bidigalu GM, GangaRao HVS, Ross RJ. 1997.** Nondestructive evaluation of green wood using stress wave and transverse vibration techniques. Materials Evaluation 55(9): 1013-1018.
- Hearmon RFS. 1958.** The influence of shear and rotatory inertia on the free flexural vibration of wooden beam. British journal of applied physics 9:381-8.
- Huang YS. 1986.** Measurement of vibration

property and dynamic viscoelasticity of wood. Research report No. 468.

Hunt JF, Zhang H, Guo Z, Fu F. 2013. Cantilever beam static and dynamic response comparison with mid-point bending for thin MDF composite panels. *Bio Res.* 8(1): 115-129.

Lee MC, Chou C. 2009. Measuring the strength property of structural laminated wood made from Japanese cedar. *Forestry Research Newsletter* Vol. 16 No. 6.

Lin CJ, Chiu CM, Wang SY. 2000. Application of ultrasound in detecting wood decay in squirrel-damaged standing trees of Luan-tai China Fir. *Taiwan J For Sci.* 15(2): 267-279.

Lin CJ, Yang TH, Zhang DZ, Wang SY, Lin FC. 2007. Changes in the dynamic modulus of elasticity and bending properties of railroad ties after 20 years of service in Taiwan. *Building and Environment* (42)1250-1256.

Murphy JF. 1997. Transverse vibration of a simply supported beam with symmetric overhang of arbitrary length. *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA 25(5): 522-524.

Murphy JF. 2011. Transverse vibrations of wood-based products: equations and considerations. Research Note FPL-RN-0324. Madison, WI:US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory p.34.

Nakao T, Okano T, Asano I. 1985. Measurement of orthotropic shear modulus for wood at a high torsional vibration mode. *Mokuzai Gakkaishi* 31(6):435-439.

Roohnia M, Kohantorabi M. 2015. Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood. *Bio Res.* 10(3): 4867-4876.

Sears FW, Zemansky MW. 1952. College Physics. Addison-Wesley Publishing Company.

Smulski SJ. 1991. Relationship of stress wave- and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. *Wood Fiber Sci.* 23(1):44-574.

Sobue N. 1985. Instantaneous measurement

of elastic constants of wood by vibration. *Proceedings of Japanese wood research society.*

Sobue N. 1986. Instantaneous measurement of elastic constants by analysis of the tape tone of wood: Application to flexural vibration of beams. *Mokuzai Gakkaishi* 32(4):274-279.

Sobue N. 1988. Simultaneous determination of Young's modulus of structural lumber by complex vibrations of bending and twisting. *Mokuzai Gakkaishi* 34(8):652-7.

Strength Testing Manual of Structural Timber. 2011. Japanese housing and wood technique center.

Timoshenko S, Young DH. 1955. *Vibration problems in engineering.* NY: Van Nostrand Reinhold.

Tsai MJ, Lin CJ, Wang SY. 2007. Establishment of standard of selecting new wood materials for restoration of listed historical building. Architecture and Building Research Institute, Ministry of the Interior, ROC (Taiwan).

Vázquez C, Gonçalves R, Bertoldo C, Baño V, Veja A, Crespo J, Guaita M. 2015. Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. *Wood Science and Technology* 49(3): 607-622

Wang SY, Chen JH, Tsai MJ, Lin CJ, Yang TH. 2008. Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *Journal of materials processing technology* 149-158.

Wang SY, Chiu CM, Lin CJ. 2002. Variations in ultrasonic wave velocity and dynamic Young's modulus with moisture content for *Taiwania* plantation lumber. *Wood Fiber Sci.* 73(3).

Yang TH, Chang FR, Lin CJ, Chang FC. 2016. Effects of temperature and duration of heat treatment on the physical, surface and mechanical properties of Japanese cedar wood. *Bio Resources* 11(2), 3947-3963.

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. *Constr Build Mater.* (22) 487-493.

Yang TH, Wang SY, Tsai MJ, Lin FC. 2007. Effect of laminate configuration on the modulus of elasticity of gulam evaluated using a strain gauge method. *J Wood Sci* 53:31-39.