

木理傾斜角及含水率對木材壓縮強度之影響

卓志隆

國立宜蘭技術學院森林系教授

摘要

本研究之目的在探討木理傾斜角及含水率對四種國內經常使用之木結構用材(花旗松、美國側柏、阿拉斯加扁柏及雲杉)壓縮強度的影響，無缺點試材取自斷面 2×4 英吋之乾燥商用製材品。試驗結果顯示木理傾斜角(0° - 90°)對壓縮強度之影響相當顯著，其關係可以 Hankinson 公式表示，四個樹種的平均 n 值為 2.64。並由統計下限值的觀念計算出不同角度時之壓縮強度比，依據此結果可更正確計算壓縮容許應力值。在含水率 25%以下時，壓縮強度隨著含水率降低會顯著地增加，以 15%含水率時之壓縮強度 (σ_{15}) 為基準時，含水率每改變 1%時，縱向壓縮強度的平均變化率 (α) 為 6%。但樹種間存在某些差異性，以花旗松及雲杉的 α 值較大，美國側柏及阿拉斯加扁柏的值較小。

關鍵詞：壓縮強度、木理傾斜角、含水率、Hankinson 公式

Effects of Grain Angle and Moisture Content on the Compressive Strength of Wood

Chih-Lung Cho

Professor, Department of Forestry , National I-Lan Institute of
Technology

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of grain angle and moisture content on the compressive strength of four wood species(Douglas-fir, western red cedar, Alaska cypress and spruce),which were frequently utilized for building construction in Taiwan . Clear specimens were cut from commercially dried 2- by 4-inch saw lumber. Results indicated that the compressive strength of four wood species were significantly affected by their grain angle(ranged from 0° - 90°). Their relationship could be represented by Hankinson's formula, and the average value of n for this formula was 2.64. By the way, from the statistic concept of lower limit, the compressive strength ratios at various grain angle were calculated. In accordance with this result, the compressive allowable stress will be induced more accurately. Below 25% moisture content, the compressive strength increase significantly with decreasing moisture content. The average rate(α) of changes in compressive strengths parallel-to-grain due to 1% moisture content changes on the basis of σ_{15} for the four species was 6%. But the rate α indicated differences between wood species. The value of α were larger for Douglas-fir and spruce, smaller for western red cedar and Alaska cypress.

Key words: Compressive strength, Grain angle, Moisture content, Hankinson's formula

一、前言

木材主要是由纖維素、半纖維素及木質素所組成之有機質異方性材料，其材質受到樹種遺傳特性，不同育林經營措施、栽植地區之土壤、氣候、方位因子影響而產生諸多變異，將樹木伐採後製材加以利用時，木材物理、機械性質等又受到大氣環境（如相對溼度、溫度、日照、風力等）、生物因子、時間因子、節、裂痕等木材缺點及木理角度等之影響而產生變化。因此有關木材之表列應力值之訂定及容許應力值計算必須考慮木材之變異及各項影響因子，經由嚴謹科學方法試驗，方可得到可靠性之應力值供為結構設計用。一般在製定表列應力值時，通常採用無缺點且木理通直之生材小試片，由試驗結果計算其平均值及標準偏差，其中縱向引張強度、縱向壓縮強度、剪斷強度、靜曲強度以 5% 下限水準值為基準，而橫向壓縮強度、靜曲彈性係數則以平均值為基準。因此，基準值乘以含水率調整因子，一般調整因子（如載重時間、應力集中等）強度比及尺寸調整因子得到不同樹種、不同品等木材之表列應力值。

影響木材壓縮強度的因子有許多，其中木理傾斜角及含水率是相當重要的影響因子，在製材時，由於取材方向或因螺旋木理之故會造成製品不同的木理傾斜角，不同角度製材品之強度會有所差異，對木材材質會造成影響。另外，當木材細胞壁內結合水增加，微纖維間由於水分子侵入使得纖維間結合強度減弱，一般而言，在纖維飽和點以下大部分木材機械強度隨著含水率增加而減低，特別是對木材壓縮強度的影響最顯著。由於目前國內正著手制訂諸多有關木結構設計標準，故本研究探討木理傾斜角及含水率因子對木材壓縮強度之影響，以量化數據作為標準訂定時相關木材壓縮強度表列應力值及容許應力調整之參考。

二、材料與方法

（一）材料

本試驗的材料為四種進口結構用針葉樹製材品，斷面尺寸 2×4 英吋。試材尺寸依 CNS453 規定製作為斷面 2×2cm，長度為 4cm 之無缺點試材。樹種名稱如下：

1. 花旗松 (Pseudotsuga menzeisii)
2. 美國側柏 (Thuja plicata)
3. 阿拉斯加扁柏 (Chamaecyparis nootkatensis)
4. 雲杉 (Picea spp.)

（二）試驗方法

將上述製材品製取木理傾斜角為 0°、15°、30°、45°、60°、75° 及 90° 不具缺點之壓縮強度用試片。將各不同角度之試材含水率分別調整至預定之 0%、10%、20%、30% 及 40% 等五種條件。每種木理傾斜角及含水率情況下之重複數為 6 個。當試材達到預定含水率後，隨即依中國國家標準 CNS453 規定[1]，採用島津牌 UH-10B 型強度試驗機試驗。載重方向與試材之木理方向如上述之 7 種角度。由試驗結果計算各試材之壓縮強度。

三、結果與討論

（一）木理傾斜角對壓縮強度的影響

本試驗四種木材各木理傾斜角時之壓縮強度，如表 1 所示。由表中可之各性質均以木理傾斜角 0° 時之試片最大，隨著木理傾斜角增加，強度急速的減低，圖 1 為花旗松在各不同含水率狀態時，木理傾斜角與壓縮強度的關係，其他樹種亦有類似之分佈，大致上當木理傾斜角大於 45° 之後，其減低之趨勢才趨於緩和，以 90° 之試片為最小。木材是由各種細胞組成，依方向性又分為縱向及橫向要素細胞，其中大部分以縱向細胞為主，特別如針葉樹木材，細胞約 90% 由縱向管胞所組成。管胞細胞壁是由初生壁，後生壁外層 (S₁ 層)，後生壁中層 (S₂)，後生壁內層 (S₃) 所組成，其中以 S₂ 層壁層最厚，且其微纖維角度與細胞長軸方向呈 5-10° 角度，為影響木材機械性質最重要壁層，微纖維是構成細胞壁之骨架物質，由纖維素鏈所構成，在纖維素鏈方向之結合為共價鍵結合，而纖維素鏈之間則為氫鍵或凡得瓦爾力之結合，故造成木材對於縱向（木理傾斜角 0°）之壓縮載重的抵抗很大，而橫向（木理傾斜角 90°）之抵抗非常小。

當載重方向與木理傾斜角呈 角度時，其壓縮強度可以 Hankison 公式表示。如第 1 式由木理傾斜角 0° 之性質與木理傾斜角 90° 之壓縮強度強度，可推算各木理傾斜角之壓縮強度。

$$S_q = \frac{S_0 \times S_{90}}{S_0 \sin^n q + S_{90} \cos^n q} \quad (1)$$

：不同木理傾斜角時之壓縮強度

S_0 ：木理傾斜角 0° 時之壓縮強度

S_{90} ：木理傾斜角 90° 時之壓縮強度

n：係數值

根據試驗結果，以 Statgraph 軟體之非線性迴歸模式，採用最小二乘法之計算得到各樹種在不同含水率狀況下時之 n 值如表 1 所示。經 F 值檢定皆呈極顯著且決定係數 R² 值大部分皆為 0.95 以上，顯示由木理傾斜角 0° 至 90° 的壓縮性質，以 Hankinson 公式來推算各角度之壓縮性質，準確性相當高。四種樹種在不同含水率條件時之平均 n 值，如表 2 所示。在不考慮含水率狀況下，木理傾斜角對壓縮強度之影響，以 Hankinson 公式表示時，其 n 值平均為 2.64。王松永 (1983) [2] 針對台灣杉及柳杉木材探討木理傾斜角對壓縮強度的影響，其統計分析結果台灣杉、柳杉壓縮強度之 n 值分別為 2.6 及 2.4。王松永等 (1996) [3] 以 Hankinson 公式分析五種木材木理傾斜角對壓縮強度之影響，其 n 值為 1.9~2.6。

(二) 不同纖維走向傾斜比時壓縮強度比

當製材時，由於取材方向或樹木生長時即產生螺旋木理，這些因素會造成製材品之木理方向與材軸不平行，造成木材強度降低，因此為結構用製材品目視分等中一項判定依據。根據 ASTM D245 (1998) [4] 木理走向傾斜比 (slope of grain) 為 1/6 (9.64°) 時，其壓縮強度須調整為縱向壓縮強度值 (即木理傾斜角 0° 時強度值) 之 56%，1/8 (7.13°) 時 66%，1/10 (5.7°) 時為 74%，1/12 (4.76°) 時為 82%，1/14 時為 87% 為 1/15 以上為 100%。本研究四種樹種在不同木理傾斜角時之壓縮強度與 0° 時之強度比值，如表 3 所示。由於各木理傾斜角之強度比值變異性相當大，若以平均強度比值作為各木理傾斜角之強度調整，則有 50% 機率不符合實際狀況，因此以 5% 或 1% 強度比下限值作為強度調整，則有 95% 或 99% 機率是符合實際壓縮的狀況，亦可確保日後結構之安全性。5% 及 1% 之強度比下限值如下列式子，結果見表 3。本研究結果與 ASTM D245 中所列之強度比資料值比較，則明顯較高，原因可能是本試驗所採用試片為無節、不具脂囊等缺點之試材，而 ASTM D245 則規定試材為含缺點之各品等結構用材，由於節等缺點的存在會使得強度比更降低。

(三) 含水率對壓縮強度的影響

圖 2 為花旗松試材在木理傾斜角 0° 時，含水率與 S/S_g 的關係圖， S 為各含水率下之壓縮強度值， S_g 為含水率 40% 時之壓縮強度值。隨著含水率的增加，此項比值呈曲線狀減低，30% 以上則幾乎為 1，其他樹種亦有相同的趨勢。觀察圖 2 兩者的關係，在含水率 0-20% 範圍內，兩者大致上呈直線關係，可由第 2 式表示：

$$\frac{S}{S_g} = c - dm \quad (2)$$

：0~20% 含水率範圍內之壓縮強度值 (kgf/cm²)

S_g ：纖維飽和點以上時 (在此以 40% 含水率為基準) 之壓縮強度值 (kgf/cm²)

m：含水率 (%)

c、d：係數值

本研究各樹種在不同木理傾斜角時，含水率與 S/S_g 之直線迴歸關係式中 c 與 d 係數值如表 4 所示。 S/S_g 等於 1 時，所計算出之含水率即一般所稱之纖維飽和點，各樹種在不同木理傾斜角時所計算出之纖維飽和點如表 4，平均值為 25.4%，與 Wood Handbook (1999) 中之資料 25% 幾乎是一致的。第 2 式中含水率若分別以 m_a 及 m_b 代入，可誘導出第 3 式如下：

$$\frac{S_a}{S_b} = \frac{c - dm_a}{c - dm_b} \quad (3)$$

若 m_b 採用 15% 含水率，可得到下列關係式：

$$S_a = S_{15} \left[1 + \frac{d(15 - m_a)}{c - 15d} \right] \quad (4)$$

將 $d/(c-15d)$ 以 α 代替，則第 4 式可化簡為

$$S_a = S_{15} [1 + \alpha(15 - m_a)] \quad (5)$$

值即代表以含水率 15% 之壓縮強度為基準時，含水率每變化 1%，壓縮強度的變化比例，結果如表 4。木理傾

斜角 0° 時，四個樹種平均值為 6.0%，與一般採用值相同。但樹種間存在有差異性，花旗松及雲杉的 值較大，分別為 6.3%及 7.3%，美國側柏及阿拉斯加扁柏的值較小，分別為 5.4%及 5.1%。造成差異的原因可能與木材的密度有關，Kretschmann 等 (1996) [5]指出密度較高的木材之縱向、橫向壓縮強度及剪斷強度受含水率的影響程度較低密度者顯著。

小田幸一等 (1994) [6]之研究結果為含水率每改變 1%時，9 種針葉樹材縱向壓縮強度的變化率平均值為 6.3%，但樹種間存在有差異性，鐵杉及日本赤松的變化率較大，分別為 7.5%及 7.8%，柳杉為 5.4%，側柏為 4.8%，最大差異達 3%。其研究亦顯示針葉樹材的縱向壓縮強度變化率與秋材管胞弦向壁厚度及秋材率呈正相關關係。

隨著木理傾斜角的增大， 值有遞減的趨勢，顯示出不同木理傾斜角之壓縮強度性質受含水率影響程度不同，以 0° 受到的影響最大， 45° 至 90° 間受到的影響較小， 90° 時 平均值僅為 2.8%。一般在制訂木材容許應力值時，除考量木理傾斜角的影響外，含水率對壓縮強度的影響通常只針對 0° 及 90° 部分進行調整，但由本研究結果可知在不同木理傾斜角時，含水率對木材的壓縮強度的影響程度不同，因此木結構設計時，若要更精確計算木材壓縮強度，應該要把這部分的影響考慮進去。

四、結 論

木材作為柱構件、土台及枕木等使用時，主要以壓縮強度作為設計之考慮，一般設計時都以表列應力值為基礎，並考量各項因子對強度的影響，最後計算出構件容許承受載重，依此判定構件是否符合安全標準。其中木理傾斜角及含水率為影響木材壓縮強度相當重要的因子，本研究以國內木結構建造時經常使用的樹種（花旗松、美國側柏、阿拉斯加扁柏及雲杉）為研究對象，探討木理傾斜角及含水率對無缺點試材之壓縮強度的影響。隨著木理傾斜角增大，壓縮強度呈曲線狀降低，利用 Hankinson 公式可準確預測各不同樹種在不同木理傾斜角時之壓縮強度，其中 n 值範圍為 2.10 至 3.13，平均值為 2.64。並由統計下限值的觀念，計算出不同木理傾斜角時之壓縮強度比，可作為容許應力調整時之依據。

四種樹種試驗木材的壓縮強度在含水率 25%以下時，會明顯地受到水分的影響，25%以上時幾乎不會變化。以 15%含水率時之壓縮強度為基準時，含水率每改變 1%時，縱向壓縮強度的平均變化率 () 為 6%，與一般習用數值相同。但樹種間存在某些差異性，以花旗松及雲杉的 值較大，分別為 6.3%及 7.3%，美國側柏及阿拉斯加扁柏的值較小，分別為 5.4%及 5.1%，且隨著木理傾斜角的增大，含水率的影響程度會逐漸減低， 90° 時之 值僅為 2.8%。

五、參考文獻

- 1、中國國家標準 CNS453(1995) 木材壓縮試驗法，經濟部標準檢驗局印行。
- 2、王松永(1983) 木材之動力學與音響學特性之研究(I)木材之音速影響因之研究，台大實驗林研究報告 150 號，第 1-23 頁。
- 3、王松永、翁麗芯(1996) 木理傾斜角對木材壓縮、硬度與噴砂特性之影響，林產工業 第 15 卷，第 4 期，第 547-573 頁。
- 4、ASTM D245(1998) Establishing structural grade and related allowable properties for visually grade lumber, American Society for Testing Materials.
- 5、Kretschmann D. E. and D. W. Green(1996) Moisture content-specific gravity relationships for clear southern pine, In:Proceedings of the international wood engineering conference 1996, Vol 2,pp.536-542.
- 6、小田幸一、堤 壽一、松村順司(1994) 樹種 異 針葉樹材 力學的性質 含水率 影響(第二報)，木材學會誌 Vol40,No.2,pp.113-118。

91 年 09 月 30 日投稿

91 年 10 月 16 日接受

表 1 不同木理傾斜角及含水率時，四種樹種壓縮強度 (kgf/cm²)
 Table 1 Compressive strength (kgf/cm²) of four wood species at different grain angle and moisture content

樹種	預定含水率 (%)	實際含水率 (%)	壓縮強度(kgf/cm ²)							Hankinson 公式統計分析	
			0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	n	R ²
花旗松	0	0	700	531	304	171	69	65	44	2.91	0.979
	10	11.2	455	358	228	141	60	58	38	2.88	0.972
	20	17.5	301	250	152	111	38	44	30	2.84	0.972
	30	28.8	206	151	111	80	35	23	24	2.54	0.950
	40	39.1	235	170	110	73	32	31	22	2.55	0.970
美國側柏	0	0	520	379	250	111	73	40	32	2.92	0.963
	10	11.3	363	275	166	95	51	34	36	2.53	0.992
	20	17.1	250	203	128	65	39	26	21	2.92	0.985
	30	31.1	160	127	75	58	31	20	16	2.70	0.968
	40	40.9	183	133	72	43	30	22	17	2.42	0.994
阿拉斯加扁柏	0	0	610	538	277	138	91	82	71	2.60	0.997
	10	11.4	391	354	209	126	71	72	56	2.62	0.998
	20	17.9	302	245	171	88	51	43	41	2.53	0.991
	30	28.4	194	146	93	65	39	34	32	2.10	0.996
	40	37.4	211	185	102	61	44	32	38	2.20	0.989
雲杉	0	0	747	563	174	110	108	73	46	2.62	0.988
	10	11.5	395	391	159	80	77	65	37	2.92	0.979
	20	18.8	311	277	119	63	48	33	25	2.87	0.995
	30	27.1	233	187	79	50	39	32	20	2.57	0.992
	40	36.2	230	217	91	43	34	22	16	3.13	0.994

表 2 Hankinson 公式之 n 值

Table 2 The n values of Hankinson' s formula.

含水率(%)	n
0	2.72
10	2.74
20	2.74
30	2.43
40	2.57
平均值	2.64

表 3 不同木理傾斜角時之壓縮強度比

Table 3 Compressive strength ratios corresponding to various grain angles.

木理傾斜角	平均值	標準偏差	變異係(%)	5%下限值 ¹	1%下限值 ²
0	1	0	0	1	1
15	0.80	0.11	13.67	0.62	0.54
30	0.45	0.08	17.19	0.32	0.26
45	0.27	0.07	24.78	0.15	0.11
60	0.16	0.03	17.31	0.11	0.09
75	0.12	0.03	22.17	0.071	0.050
90	0.10	0.03	32.26	0.051	0.030

1: 5%下限值 = 平均值 - 1.645×標準偏差

2: 1%下限值 = 平均值 - 2.33×標準偏差

表 4 直線迴歸方程式中係數值 c、d 與計算出之 值及纖維飽和點
 Table 4 Constants c and d in linear regression equations, and the induced value and fsp.

樹種 Species	木理傾斜角(o) Grain angle(o)	c	d	(%)	纖維飽和點(%) fsp(%)
花旗松	0	2.985	-0.0966	6.3	20.55
	15	3.128	-0.0939	5.5	22.66
	30	2.821	-0.0773	4.7	23.56
	45	2.370	-0.0461	2.8	29.72
	60	2.229	-0.0523	3.6	23.49
	75	2.159	-0.0374	2.3	30.98
	90	2.069	-0.0358	2.3	29.87
美國側柏	0	2.869	-0.0854	5.4	21.88
	15	2.866	-0.0764	4.4	24.43
	30	3.446	-0.0999	5.1	24.48
	45	2.672	-0.0596	3.4	28.05
	60	2.452	-0.0670	4.6	21.68
	75	1.824	-0.0358	2.8	23.03
	90	1.979	-0.0277	1.8	35.34
阿拉斯加扁柏	0	2.860	-0.0825	5.1	22.54
	15	2.739	-0.0831	5.6	20.93
	30	2.720	-0.0581	3.1	29.60
	45	2.348	-0.0428	2.5	31.50
	60	2.097	-0.0502	3.7	21.84
	75	2.680	-0.0643	3.7	26.13
	90	1.899	-0.0432	3.4	20.82
雲杉	0	3.151	-0.1036	7.3	20.77
	15	2.602	-0.0701	4.5	22.86
	30	1.968	-0.0309	2.1	31.33
	45	2.523	-0.0576	3.5	26.44
	60	3.180	-0.0913	5.0	23.87
	75	3.401	-0.0954	4.8	25.16
	90	2.900	-0.0661	3.5	28.74

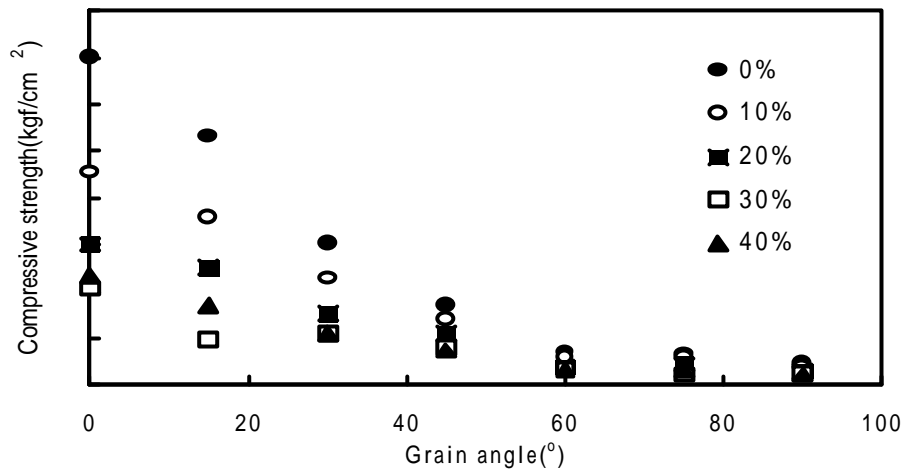


圖 1 不同含水率狀態時，花旗松之壓縮強度與木理傾斜角的關係

Fig1 The relationship between compressive strength and grain angle of Douglas-fir at different moisture content

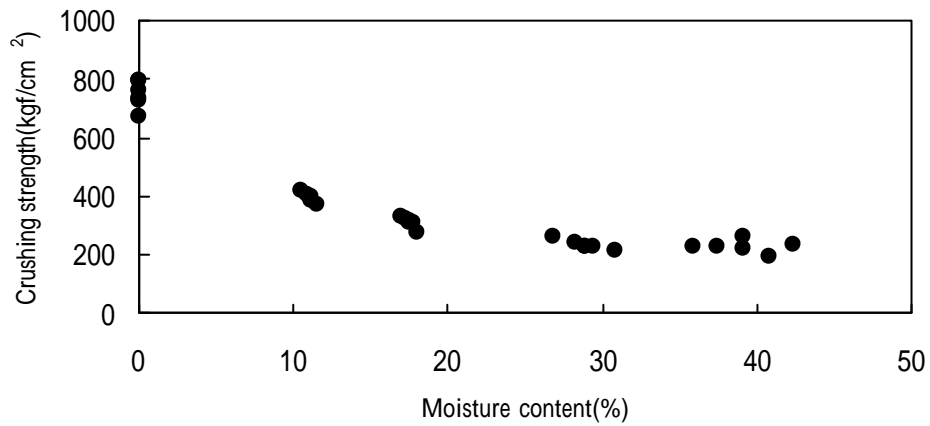


圖 2 花旗松木理傾斜角 0° 時，含水率與壓縮強度的關係

Fig. 2 The relationship between moisture content and compressive strength of Douglas-fir at 0° grain angle