

第一節 密度與比重

乾燥之木材係由細胞壁中之木材實質與細胞內腔等之空隙及少量之抽出成分所構成者。但因抽出成分等和木材實質相比較，係可忽視程度之微量，所以乾燥木材之密度可考慮以單位容積中之木材實質質量加以表示；因此，木材之密度會與其物理性質及機械性質有密切關係。木材之密度依樹種而有不同，又即使是同一樹種，亦會依其個體或部位而異；木材之密度會因含水率而變化，所以必須在同一含水率之數值下加以比較。標準含水率是指絕乾狀態¹或氣乾狀態²之含水率（在日本是取 15%，在歐美地區是取 12%）。

密度被定義為每單位容積之質量。容積，如試體係為正立方體，內部無龜裂時，可從三邊的長度求出；如試體為不規則的形狀，可利用水銀浸漬法或水浸漬法求出，但多少會有誤差（淺野猪久夫，1982）。

一般是採用比重，而不採用密度來當作木材材質指標之標準比較值。此係因即使利用不同之單位，比重之值不變，故比較上較為方便。比重為木材之質量與同容積之水的質量之比。以水分計（Wood Moisture Meter）測量時，溫度在可忽視之範圍內，水之質量（g）與其容積（cm³）為同一數值，所以為避免與含水率（g / g）相混亂，木材之比重係以容積標準數

¹ 絕乾狀態（oven dried condition）係木材在 100 ~ 105°C 下，乾燥至質量不變為止之無水狀態者。

² 氣乾狀態（air-dried condition）係木材含有與通常大氣溫濕度相平衡之水分狀態。

值 g/cm^3 （即容積重，bulk density）表示。木材之容積重從最小之 0.1 g/cm^3 （白塞木，Balsa）至最大之 1.3 g/cm^3 （癒瘡木，Lignum Vitae）。

一、真比重

真比重（specific gravity of cell wall）係指沒有空隙在內之實質部分，即細胞壁之比重（ γ_H ）。各樹種間之比重值大概為一定，但會依細胞壁構成分的比例而有些許不同。而且它並不像容積重那樣，會依樹種不同而有很大的差異。真比重可以木材實質與液體或氣體置換，再從其所排除之容積與木材實質質量來測定；所得值依媒體種類而異。以水置換法所求得之真比重為 $1.50 \sim 1.55$ （淺野猪久夫，1982），由此方法所求得之比重，因細胞壁中之水分有膨潤壓的關係，會較由非膨潤性之溶劑置換所求出的比重為大。依由不會使木材膨潤之氦（He）或苯（Benzene）置換而求得白雲杉（white spruce）之真比重為例，當以氦置換時，真比重 $\rho_w = 1.46$ ，苯置換時 $\rho_w = 1.44$ ，水置換時 $\rho_w = 1.53$ 。其中以利用氦置換之方法為最正確，而一般針葉樹、闊葉樹材之真比重多為 1.50 。

二、空隙率

由木材真比重與容積重可求出木材之實質率、空隙率（void volume）。即絕乾木材之空隙率（C）可由次式表示：

$$\begin{aligned} C &= 100 - m = \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_H}\right) \times 100 (\%) \\ &= \left(1 - \frac{\gamma_0}{1.50}\right) = (1 - 0.667 \gamma_0) \times 100 (\%) \end{aligned} \quad 1-1$$

上式中，C 為空隙率（%）， γ_H 為真比重，m 為實質率 = γ_0 / γ_H ， γ_0 為絕乾比重（specific gravity in oven dry）。

而任意含水率之木材空隙率（C'）可以次式表示：

$$C' = \left[1 - R' \left(\frac{1}{\gamma_H} + \frac{u_h}{\rho_s} + \frac{u_k}{\rho}\right)\right] \times 100 (\%) \quad 1-2$$

$$C' = [1 - R' (\frac{1}{\gamma_{H'}} + \frac{u_h + u_k}{\rho})] \times 100 (\%) \quad 1-3$$

1-3 式係適用於纖維飽和點³以上之狀態。

上式中， $R' = \frac{W_0}{V_u}$ ，即 W_0 為木材絕乾重， V_u 為木材含有 $u\%$ 含水率時之體積。 γ_H 為真比重 1.46， $\gamma_{H'}$ 為以水置換所得之真比重 1.53。 u_h 為結合水（即吸著水）含量（g / g）， u_k 為自由水含量（g / g）。 ρ_s 為結合水平均比重，如圖 1-1 所示（Franz & Wilfred, 1967）。 ρ 為常溫下水的比重，通常 $\rho = 1$ 。表 1-1 為部分木材之空隙率與絕乾比重之關係。

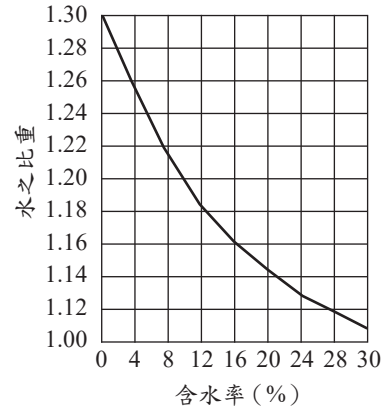


圖 1-1 木材細胞壁結合水之密度與含水率的關係

表 1-1 部分木材之絕乾比重與空隙率

樹種	絕乾比重 γ_0	空隙率 %
鐵杉 <i>Tsuga sieboldii</i>	0.49	68
冷杉 <i>Abies sachalinensis</i>	0.38	76
柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i>	0.40	74
山毛櫸 <i>Fagus crenata</i>	0.51	67
櫟 <i>Quercus mongolica</i> Fish. var <i>grosseserrata</i>	0.68	56
日本櫟木 <i>Zelkova serrata</i>	0.59	62
日本桂樹 <i>Cercidiphyllum japonicum</i>	0.40	74
日本厚朴 <i>Magnolia obovata</i>	0.43	72
日本泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i>	0.26	83
白塞木 <i>Ochroma lagopus</i>	0.1 (0.05 ~ 0.17)	94
癒瘡木 <i>Guajacum officinale</i>	1.23 (0.95 ~ 1.31)	—
壓縮木材 Compressed wood	1.05 ~ 1.46	5
硬化積層材 Compreg	1.20 ~ 1.45	—

資料來源：越島哲夫等（1973）。

³ 當細胞壁內完全被水分所飽和，而細胞內腔或細胞間隙等之空隙中不存在液狀水分之狀態，其含水率稱為纖維飽和點（fiber saturation point，簡稱 F. S. P.）。

第二節 密度與含水率

木材因含水率改變時，它的質量及容積均會改變，因此密度會依含水率而異。在表示木材密度時需將它的含水率明示。木材之密度種類依含水率的不同而區分為次述四種。

一、絕乾比重

$$\gamma_0 = W_0 / V_0 \quad 1-4$$

因在乾燥之際，木材試片會變形，故絕乾體積（ V_0 ）較難正確的測定。而往往以氣乾體積（ V_u ），即以含有 $u\%$ 含水率時之體積代替 V_0 使用。即 $\gamma_0' = W_0 / V_u$ ，此 γ_0' 稱之為試驗時比重（絕乾比重），它可與 γ_0 相區別。如欲將 γ_0' 換算成 γ_0 時，需先求出該木材從纖維飽和點至絕乾狀態時，含水率每減少 1% 時之容積收縮率（ $\alpha_v\%$ ）及 V_u ，代入次式，即可求出 γ_0 ：

$$\gamma_0 = \gamma_0' \times \frac{1}{1 - 0.0003\alpha_v \times u} = \gamma_0' \times \frac{100}{100 - 0.03\alpha_v \times u} \quad 1-5$$

或

$$\gamma_0' = \gamma_0 \times \frac{100}{100 + \beta_v \times u} = \gamma_0 \times \frac{100}{100 + 0.84\gamma_0 \times u} \quad 1-6$$

上式中， $\beta_v\%$ 為含水率每增加 1% 時之容積膨潤率。

二、氣乾比重

$$\gamma_u = \frac{W_u}{V_u} \quad 1-7$$

木材在立木狀態時含有多量水分，但當置於大氣中時，它的水分會漸

漸蒸發而減少，最後達到與該時之溫度及相對濕度成平衡之含水率，此狀態之含水率稱為氣乾狀態。而此時木材所含有水分量會隨相對濕度之變化而改變，即氣乾含水率並非保持一定值，也因此氣乾比重（specific gravity in air day）亦具有變化之值。比較木材之性質時，含水率需一定，其先定標準含水率之原因即在此。

假使 γ_0 已知時，含水率在 0 ~ 25% 範圍內，依次式可計算出 γ_u ：

$$\gamma_u = \gamma_0 \times \frac{100 + u}{100 + \alpha_v \times u} \quad 1-8$$

上式中， u 為含水率， α_v 為含水率減少 1% 時之平均容積收縮率。而 α_v 和比重之間有比例關係，即 $\alpha_v = 28\gamma_0$ (%)，當 $u = 25\%$ 時，其容積膨潤率會達最大值，平均值約 75%，則 $0.75\alpha_v / 25 = 0.03\alpha_v = 0.84\gamma_0$ 。

所以
$$\gamma_u = \gamma_0 \times \frac{100 + u}{100 + 0.84\gamma_0 \times u} \quad 1-9$$

又
$$\gamma_u = \frac{W_u}{V_u} = \frac{W_0 (1 + u)}{V_0 (1 + \alpha_v \times u)} = \gamma_0 \times \frac{1 + u}{1 + \alpha_v \times u}$$

但
$$\alpha_v = \frac{\alpha_{vmax} \times 0.75}{25} = \frac{28\gamma_0 \times 0.75}{25} = 0.84\gamma_0$$

$$\therefore \gamma_u = \gamma_0 \times \frac{100 + u}{100 + 0.84\gamma_0 \times u}$$

而在標準含水率狀態下之比重為 γ_{15} ，即 $\gamma_{15} = \frac{W_{15}}{V_{15}}$ ，此 γ_{15} 與 γ_u 之間有如次式之關係：

$$\gamma_{15} = \gamma_u \left\{ 1 - \alpha_v'' (15 - u) \frac{1}{100} \right\} \frac{115}{100 + u} \quad 1-10$$

上式中， α_v'' 係以 V_{15} 為基準時，含水率每改變 1% 的容積變化率 (%)。

即：

$$\alpha_v'' = \frac{(V_{15} - V_u)}{V_{15} (15 - u)} \times 100 (\%) \quad 1-11$$

表 1-2 為部分臺灣木材之氣乾比重。

表 1-2 臺灣產木材之容積密度、氣乾比重及絕乾比重

樹種	容積密度 R (g / cm ³)	氣乾比重 γ_u	絕乾比重 γ_0	引用文獻
臺灣扁柏	0.41	0.50	0.45	王松永、謝祈元 (1987)
紅檜	0.35	0.41	0.38	
臺灣鐵杉	0.46	0.53	0.53	
臺灣杉	0.30	0.40	0.36	王松永 (1989)
杉木	0.30	0.37	0.33	
柳杉	0.40	0.49	0.45	
巒大杉	0.37	0.45	0.41	王松永 (1988)
臺灣雲杉	0.39	0.45	0.42	
臺灣冷杉	0.39	0.49	0.45	
長尾尖槲	0.47	0.54	0.50	王松永、夏榮生 (1990)
光臘樹	0.61	0.71	0.63	
臺灣櫟	0.69	0.79	0.73	
烏心石	0.50	0.62	0.57	王松永、張志仁 (1991)
錐果櫟	0.75	0.85	0.80	
臺灣赤楊	0.47	0.54	0.54	
相思樹		0.88		Wang (1990)
木荷		0.67		
柚木		0.65		
南投黃肉楠		0.57		
石櫟		0.85		

三、生材比重

$$\gamma_g = \frac{W_g}{V_g} \quad 1-12$$

生材比重 (specific gravity in green) 是依含水率不同而異之值， V_g 是生材體積，在含水率超過 35% 以上時不會變化。 W_g 為生材質量，會隨時變化。

四、容積密度

$$R = \frac{W_0}{V_g} \text{ (g / cm}^3\text{)} \text{ 或 } R = \frac{W_0}{V_g} \times 100 \text{ (kg / m}^3\text{)} \quad 1-13$$

紙漿工業中絕乾重較其材積更為重要，可由上式求出其絕乾重 (W_0)。容積密度 (bulk density) R 和 γ_0 之間，有如次之關係：

$$R = \gamma_0 \times \frac{100}{100 + \beta_{vmax}} = \gamma_0 \times \frac{100}{100 + 28\gamma_0} \quad 1-14$$

$$\gamma_0 = R \times \frac{100}{100 - \alpha_{vmax}} = R \times \frac{100}{100 - 28R} \quad 1-15$$

上式中， α_{vmax} 為木材全容積收縮率 (%)，實驗式 $\alpha_{vmax} = 28R$ (%)， β_{vmax} 為木材全容積膨潤率 (%)，而 $\beta_{vmax} = 28\gamma_0$ (%)。

又，含水率 u_1 及 u_2 時之比重各為 γ_{u1} ($= W_{u1} / V_{u1}$) 及 γ_{u2} ($= W_{u2} / V_{u2}$) 時，含水率在 0 ~ 25% 範圍內，利用次式可將 γ_{u1} 換算成 γ_{u2} (淺野猪久夫，1982)。

$$\gamma_{u2} = \gamma_{u1} + C (u_2 - u_1) / 100 (C \doteq 0.2) \quad 1-16$$

圖 1-2 為任意含水率之比重換算圖例。

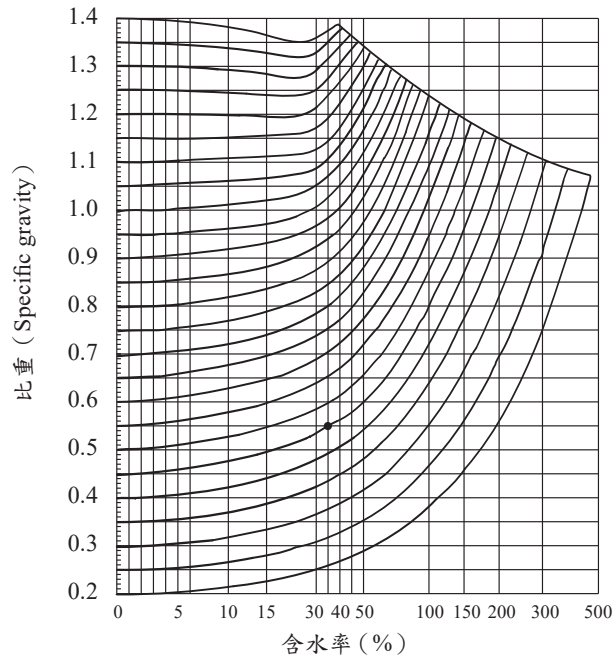


圖 1-2 木材比重之換算圖例：絕乾比重 0.45 之木材，在含水率 35% 時之比重為 0.55

圖 1-3 為忽視結合水之比重變化，將木材之真比重當作 1.50，絕乾及纖維飽和狀態之木材實質、空隙及結合水之容積率與木材之各絕乾比重加以表示者。例如就比重為 0.5 之木材加以觀察時，絕乾狀態之實質率與空隙率各為 33.3% 與 66.7%（依 1-1 式），結合水之吸著所引起實質增加率為 $28 \times 0.5 = 14\%$ （依 1-9 式），因此纖維飽和狀態（全容積 114%）之木材實質 + 結合水之容積率為 47.3%（全容積當作 100% 時，為 41.5%），空隙率是 66.7%（全容積當作 100%，為 58.5%）。全容積當作 100% 時，在 1-3 式， $R' = 0.439$ （依 1-14 式計算者）， $\gamma_H' = 1.50$ ， $u = 0.28$ （纖維飽和點之含水率假定是 28%）， $u_h = 0$ ， $\rho = 1$ 時，木材實質（29.2%）+ 結合水（12.3%）之容積率為 41.5%，及空隙率是 58.5% 係相一致。

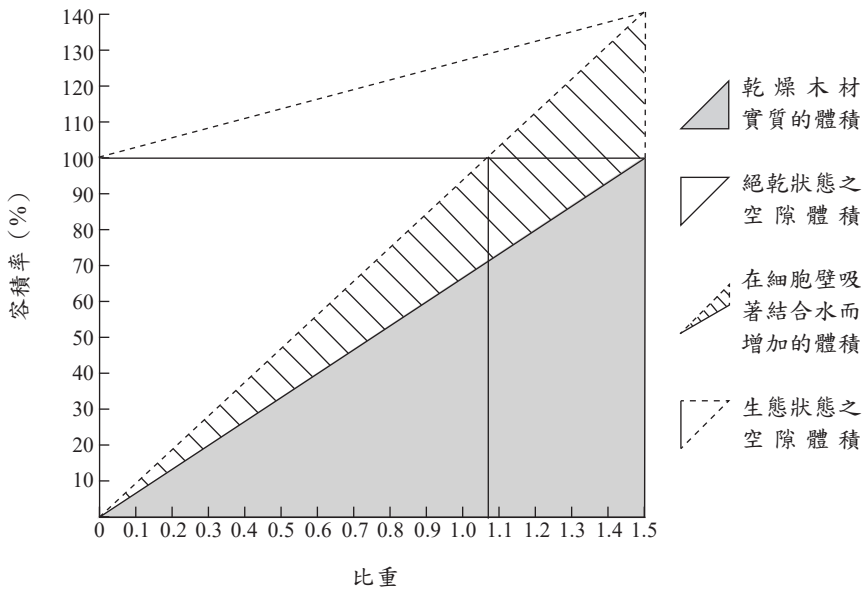


圖 1-3 乾燥及濕潤狀態之空隙體積、乾燥質量體積與比重之關係

資料來源：Kollmann & Côté (1968)；越島哲夫等 (1973)。

第三節 木材密度之變化

在一棵樹體內，或樹種間之比重並非一定值。同一樹體會依其部位，而同一樹種會依其生育地條件之不同而有差異。如扁柏材之比重（密度）不具固定值，而柳桉材則其外周部分比重較高，脆心材部分比重較低，如圖 1-4 所示。在一年輪內，春材比重低，秋材比重高，如表 1-3 所示。秋材和春材比重之比值在針葉樹材為 1.9 ~ 3.0 : 1，散孔材為 1.5 ~ 1.9 : 1，環孔材為 2.2 ~ 2.8 : 1。

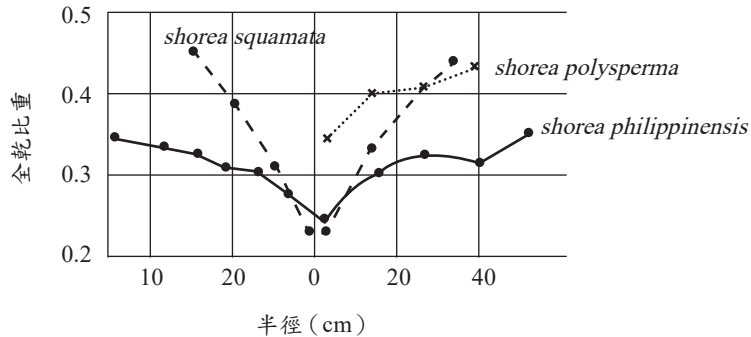


圖 1-4 柳桉材之比重變化

資料來源：北原覺一（1968）。

表 1-3 部分木材之春材與秋材比重

樹種		絕乾比重 γ_0		秋材/春材
		春材	秋材	
針葉樹	雲杉 (<i>Picea</i> sp.)	0.340	0.650	1.91
	冷杉 (<i>Abies sachalinensis</i>)	0.277	0.625	2.26
	松 (<i>Pinus</i> sp.)	0.333	0.824	2.47
	落葉松 (<i>Larix</i> sp.)	0.360	1.040	2.89
散孔材	槭樹 (<i>Acer</i> sp.)	0.502	0.750	1.50
	山毛櫸 (<i>Fagus crenata</i>)	0.502	0.935	1.86
	日本假樹 (<i>Tilia japonica</i>)	0.361	0.566	1.57

樹種		絕乾比重 γ_0		秋材／春材
		春材	秋材	
環孔材	櫟 (<i>Quercus</i> sp.)	0.330	0.925	2.81
	光臘樹 (<i>Fraxinus japonica</i>)	0.370	0.814	2.21

第四節 春秋材密度與年輪寬之相互關係

針葉樹材與環孔材闊葉樹之春、秋材密度差異，較散孔材闊葉樹明顯。但有些樹種一年輪內春、秋材密度差異很小，如白松（White Pine）是一種含有均一組織，且易於加工之樹種。另外，南方松（Southern Pine）與花旗松（Douglas-fir）則兩者差異很明顯；秋材一般較春材易變動。春材密度是從髓心向樹皮方向會稍微減小，或維持一定，由基部向頂端方向會減小；秋材則從髓心向樹皮方向會增大，而由基部向頂端方向會減小。一般針葉樹材之密度和秋材率間，依 Ylinen 有次述之理論關係（Kollmann & Côté, 1968）：

$$\rho_0 = \rho_{c0} + (\rho_{l0} - \rho_{c0}) S \tag{1-17}$$

上式中， ρ_0 為木材在 0% 含水率時之密度， ρ_{c0} 、 ρ_{l0} 各為 0% 含水率時，其春材和秋材之密度。S 為秋材率。圖 1-5 表示由松材（Finish Pine）所求得比重和秋材率之理論關係。而圖 1-6、圖 1-7 各表示針葉樹材及闊葉樹材之比重與秋材率的關係。可看出隨秋材率的增加，針葉樹材比重會呈直線狀增大，而闊葉樹材比重則會呈直線狀或拋物線狀增大。

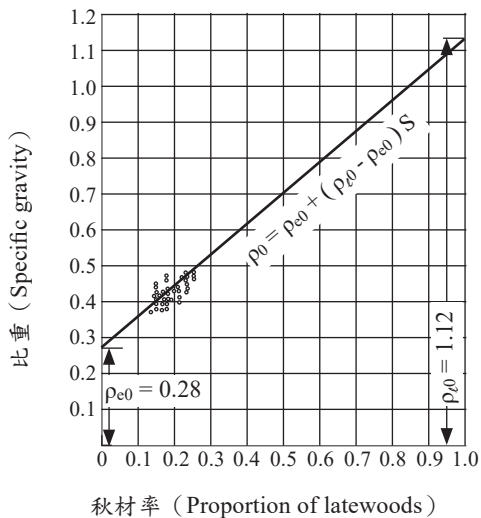


圖 1-5 秋材率與比重之關係

資料來源：Kollmann & Côté (1968)。