

國產材應用於直交集成板的生產

林志憲^{1*}、塗三賢¹、陳盈全¹

前言

自從全球氣溫升高伴隨著更極端的大自然災害發生，從京都議定書 (Kyoto Protocol, 1997) 到巴黎協定 (Paris Agreement, 2015)，皆在努力減少溫室氣體對環境的影響，對於氣候變遷的因應方式，賦予減碳固碳行動更實質的約束，讓「碳匯」、「碳權」登上搜尋關鍵字，柳婉郁 (2022) 比較藍碳 (海洋碳匯)、黃碳 (土壤碳匯) 和綠碳 (森林碳匯) 後發現，綠碳具有最佳的二氧化碳吸收能力，也相對其他二者容易數學量化，除了造林樹種之新植造林，使用木材更是有效儲存二氧化碳的方式之一，尤其是作為木構造建築之建材，在生命週期 (約40年) 均可儲存並視為都市森林 (王松永，2005)，因此多使用木材成為各國重點策略之一。

近年來，國際間為達淨零目標，多以政策形式促進使用木材，其中日本於2019年修改「實踐脫碳社會之建築物木材利用促進法」，由公共工程推展至一般建築，達到木材利用之目標，特別在促進國產材提升部分，也促進日本林業、木材工業與振興山村經濟發展。隨著減碳議題受到關注，我國政府也訂定2050年淨零碳排的目標，因應氣候變遷對全球環境之影響，提倡使用國產材為政府、學校、林農、加工廠等努力發展的目標，當木材的固碳效益再次被重視，農林業將扮

演相當重要的角色，具有耐久特性的木構造建築儼然是最佳的碳儲存及碳替代方式。

現今木材加工設備與膠合技術提升，工廠生產尺寸自由度增加，可以有效利用各種尺寸的木材，透過機械等級區分之木材更能有效生產具有工程用途之集成材等品質穩定的木材產品。對於臺灣人工林造林樹種而言，採用集成方式加工中小徑木，可以有效率的去除木材本身的缺點，不論是工程建築用途或是裝修材料，皆能製作符合尺寸與強度之需求的產品。

CLT的製造

直交集成板 (Cross-laminated timber, CLT) (圖1) 可以作為木構建築的結構材料，也是日本國產材發展策略的重要產品之一，屬於單一產品材積量最大之工程木材，具有可觀的固碳與節能之效益，在地生產更能達到降低



圖1 使用林業試驗所六龜研究中心臺灣杉造林木製成的直交集成板 (林志憲 攝)

¹ 林業試驗所森林利用組

* 通訊作者 (twclt@tfri.gov.tw)

表1 國家標準CNS 16114 (2019) 之A種構成集成元等級

等級區分機之等級	抗彎彈性模數 (GPa)		抗彎強度 (MPa)		抗拉強度 (MPa)	
	平均值	下限值	平均值	下限值	平均值	下限值
M120A	12.0	10.0	42.0	31.5	25.0	19.0
M90A	9.0	7.5	34.5	26.0	20.5	15.5
M60A	6.0	5.0	27.0	20.0	16.0	12.0
M30A	3.0	2.5	19.5	14.5	11.5	8.5

運輸成本與生產過程之碳排放。CLT為平板形狀之工程木材產品，提供強軸方向(平行面板纖維方向)與弱軸方向(垂直面板纖維方向)之抗彎能力，CLT由集成元和膠合劑組成，結構同於常見之合板(Plywood)，但是集成元是具有一定厚度(12 mm至50 mm)之木材，應用於結構或建築則需要經過機械等級區分(表1)，讓生產出的工程木材具有安全性，並非隨意取用木材膠合而成之產品。

目前應用於CLT之膠合劑有酚-間苯二酚甲醛共聚合系(Phenol-resorcinol formaldehyde, PRF)、異氰酸酯系(Emulsion polymer isocyanate, EPI)和聚氨酯系(Polyurethane, PU)等常溫硬化型之膠合劑。早期生產CLT為集成元經過側拼膠合成片(Ply)，採用奇數層(Layer)直交堆疊(圖2)並膠合達到需求厚度，可以沿用既有木材工廠設備，然而膠合劑塗佈面積非常大，讓CLT尺寸受到限制且加工費時，後期使用自動化流程生產，設備加工尺寸之寬度可達到6公尺，長度更達到20公尺以上，利用自動佈膠設備並且使用常溫作業且硬化速度較快之膠合劑，加壓壓力達到膠合需求(10 kgf/cm²)以降低作業時間與能源消耗，CLT經過切削加工成建築物之門、窗、管道等之開口後，可直接在建築基地進行組裝，具有建造快速與節省人力之優點。

CLT的機械性能

當集成元經過機械等級區分，可以獲得材料之工程參數，有助於提高國產材之材料利用率與強度設計，其中抗彎彈性模數(Modulus of elasticity, MOE)和抗彎強度(Modulus of rupture, MOR)為評估工程木材承受彎曲的方式，工程木材為強度可設計之木質材料，集成元透過集成公式可以預測工程木材之抗彎強度(Yang et al., 2008)，由於膠合層之比例低，提供之MOE相對較小，CLT之理論MOE(MOE_{Theory})對於考量膠合層計算與否並無太大差異，依據Karacabeyli and Douglas (2013)之集成方程式公式，由各CLT



圖2 CLT的抗彎彈性模數(MOE)可經由單片的平均MOE與中立軸距離，分別計算CLT強軸方向與弱軸方向之理論MOE(林志憲 攝)

單片之平均MOE與中立軸距離，可以分別計算CLT強軸方向與弱軸方向之理論MOE。

$$E_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n E_i \times b_i \times \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i \times A_i \times z_i^2$$

其中， E_{eff} 是CLT的剛性， I_{eff} 為CLT之慣性矩 ($bh_3^3 / 12$)； E_i 為各層單片之平均MOE，直交層平均MOE則調整為平行層MOE之1/30 (APA, 2019)， z_i 為各層單片中立軸至中立軸距離； b_i 為各層單片之寬度； h_i 為各層集成元之厚度； A_i 為集成元之斷面積。

理論MOE與實際MOE之間具有良好的相關性，簡而言之，利用集成元MOE可以在製作與配置CLT階段進行設計，有效預測生產工程木材之抗彎性能 (表2)，為國家標準CNS 16114 (2019) 之CLT等級與抗彎性質，以異等級構成 (Mx60) 與同等級構成 (S60) 為例，依據不同層數與片數必須達到之強軸方向最低強度性質，異等級構成 (Mx) 之集成元等級為M60、M90和M120，直交層可使用M30等級；同等級構成 (S) 之集成元等級為M30、M60、M90和M120，平行層和直交層皆使用相同等級集成元，CNS國家標準目前僅要求強軸方向之機械性質，對於弱軸方向之機械性質目前無

規定。

林業試驗所使用國內六龜地區之臺灣杉 (*Taiwania cyptomerioides*) 造林木2×4規格材，依據CNS 16114 (2019) 之集成元A種構成等級標準，進行機械等級區分並配置製作成CLT，再利用板類振動試驗進行板狀材料之非破壞評估，研究結果顯示3層3單片構成CLT之中間層集成元對強軸方向抗彎彈性模數影響較小，可以有效利用機械等級較低之集成元作為中間層使用；5層5單片構成CLT之橫向層數增加，強軸方向之抗彎彈性模數減少21%至25%，但是弱軸方向之抗彎彈性模數則增加一倍以上，若是使用相同集成元等級條件下，可以透過5層5單片之CLT組成結構，提升弱軸方向抗彎彈性模數。國產材經過機械等級區分可以製作強度可預期之CLT，更能設計不同方向之抗彎彈性模數需求，具有提高各等級集成元使用效率之優點，適材適用並達到大量且有效的固碳成果。此外，利用板類振動試驗進行板狀材料之非破壞評估，臺灣杉CLT之抗彎彈性模數理論值 (E_{Theory}) 與非破壞試驗值 (E_{PVT}) 具有良好的相關性，其相關係數為0.92以上，顯示使用經過機械等級區分之國產材，可以製

表2 國家標準CNS 16114之CLT強度性質

項目	強度等級	構成的區分	抗彎彈性模數 (GPa)		抗彎強度 (MPa)
			平均值	下限值	
異等級構成	Mx90-3-3	3層3片	7.8	6.4	14.0
	Mx90-5-5	5層5片	6.2	5.0	12.2
	Mx60-3-3	3層3片	5.2	4.2	11.6
	Mx60-5-5	5層5片	4.2	3.4	9.8
同等級構成	S90-3-3	3層3片	7.8	6.4	15.6
	S90-5-5	5層5片	6.4	5.2	12.8
	S60-3-3	3層3片	5.2	4.2	12.2
	S60-5-5	5層5片	4.2	3.4	10.0
	S30-3-3	3層3片	2.6	2.0	8.8
	S30-5-5	5層5片	2.0	1.6	7.2

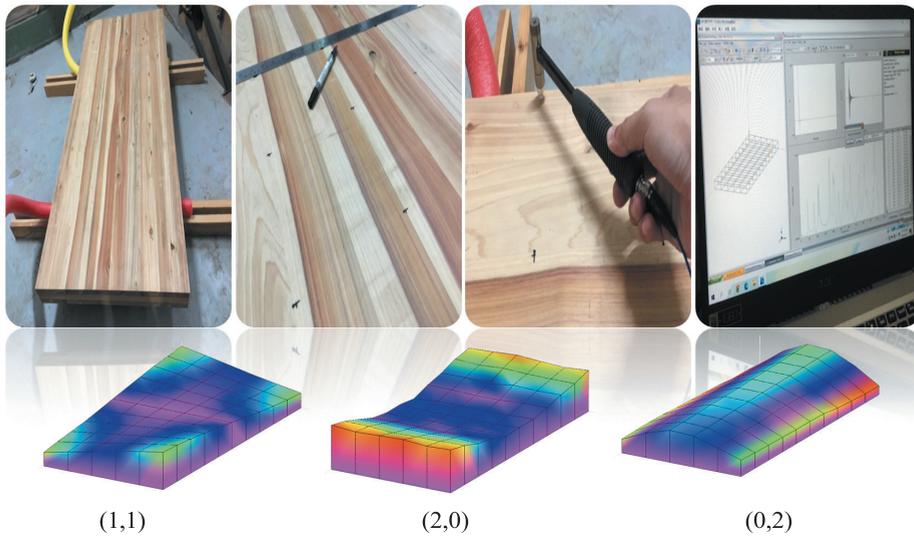


圖3 以板類振動試驗進行板狀材料的非破壞評估，可推算出CLT的抗彎彈性模數 (林志憲 攝)

造強度可設計之CLT工程木材產品，並可利用非破壞評估方式檢測成品的強度，有助於提高國產材之材料利用率與強度設計 (圖3及圖4)。

結語

當全球都在努力減少環境變化的衝擊，使用經過永續森林認證之木材與提高國內木材自給率，已經是國際利用森林資源之趨勢，木材產品具有固碳的效益，減緩二氧化碳回到大氣之碳循環速度，更可減少非法木材流通且有助於環境保護與全球暖化問題，臺灣木材

產品使用量每年達600萬立方公尺，具有相當高的消費與固碳能力，根據臺灣進口木材來源與市場偏好的研究結果顯示，臺灣生產或銷售木製品廠商中，58%以上完全使用進口木材，34%部分使用國產材，僅8%完全使用國產材，有鑑於各國重視木質材料永續經營，降低進口木材的依賴與提升木材自給率，國產材之生產與利用應妥善規劃，尤其是國產材中小徑木居多，CLT可以有效利用國產中小徑木製作大型結構用板材，有效運用各種尺寸原木，並且生產具有工程性能之木質材料。⊗

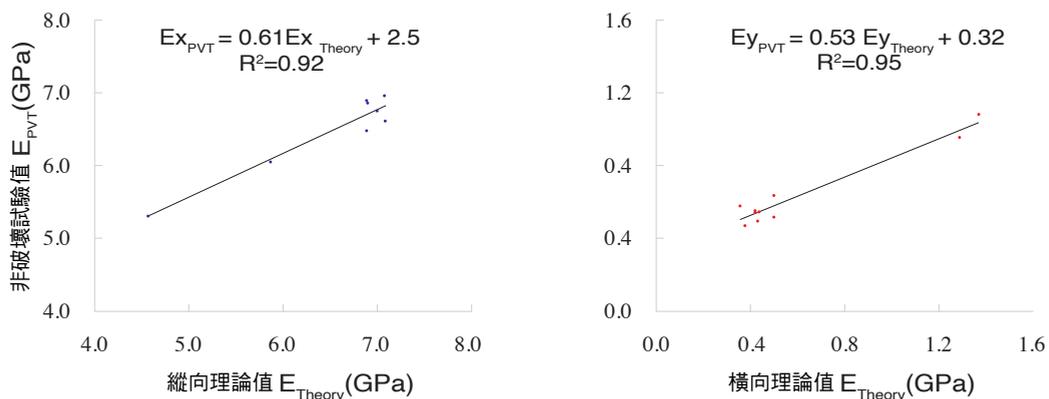


圖4 臺灣杉CLT之抗彎彈性模數理論值 (E_{Theory}) 與非破壞試驗值 (E_{PVT}) 具有良好的相關性 (林志憲 繪)