

## 研究報告

## 應用自攻螺絲於直交集成板接合之剪斷抵抗探討

葉民權<sup>1,2)</sup> 林玉麗<sup>1)</sup> 顏大翔<sup>1)</sup> 林秀鑾<sup>1)</sup>

## 摘 要

本研究以自攻螺絲為扣件進行直交集成板之接合，探討不同接合型式及不同用釘角度對接合剪斷抵抗之影響。利用國產柳杉製造五層五片對稱異等級直交集成板，並考量南方松混合製造之影響。結果顯示直交集成板以方栓接合型式之最大破壞剪斷容量、降伏剪斷載重及初始剛性分別為對接型式之16、13及22%，搭接型式則為對接型式之63、64及38%。在不同用釘角度方面，以90°直釘及45°斜釘方式固定之接合最大剪斷破壞容量為30°~45°複斜用釘方式之40%，而接合之降伏剪斷載重分別為以30°~45°複斜用釘方式之30及47%，另接合之初始剛性分別為30°~45°複斜用釘方式之11及35%。以南方松為外層集成元之直交集成板在以自攻螺絲所組成之對接型式可以有效提升接合剪斷抵抗效果。以自攻螺絲所組成之接合部位依塑性率分類，方栓之接合屬於高延展性，直交集成板之對接屬於中度延展性，直交集成板之搭接則屬於低延展性。

關鍵詞：直交集成板、自攻螺絲、接合、剪斷抵抗。

葉民權、林玉麗、顏大翔、林秀鑾。2019。應用自攻螺絲於直交集成板接合之剪斷抵抗探討。台灣林業科學34(3):179-95。

<sup>1)</sup> 國立屏東科技大學木材科學與設計系，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Department of Wood Science and Design, National Pingtung Univ. of Science and Technology, 1 Shuehfu Rd., Neipu Township, Pingtung 91201, Taiwan.

<sup>2)</sup> 通訊作者 Corresponding author, e-mail:yehmc@mail.npust.edu.tw

2019年4月送審 2019年7月通過 Received April 2019, Accepted July 2019.

Research paper

## Investigation of the Shear Resistance Performance of Cross-Laminated Timber Connections with Self-Tapping Screw Applications

Min-Chyuan Yeh,<sup>1,2)</sup> Yu-Li Lin,<sup>1)</sup> Tai-Hsiang Yen,<sup>1)</sup> Hsiu-Luan Lin<sup>1)</sup>

【 Summary 】

The effects of connection types and nailing angles on the shear resistance performance of cross-laminated timber (CLT) connections using self-tapping screws were investigated in the study. The 5-layer- and 5-ply-CLT connections with heterogeneous-grade construction were made using *Cryptomeria japonica* plantation timber, and were also mixed with southern pine (*Pinus* spp.). Results showed that the maximum shear capacity, yield shear load, and initial stiffness of a CLT surface spline connection were 16, 13, and 22%, respectively, of a CLT butt connection. The maximum shear capacity, yield shear load, and initial stiffness of a CLT half-lap connection were 63, 64, and 38%, respectively, of a CLT butt connection. As to effects of nailing approaches, the maximum shear capacity of connections fastened with self-tapping screws at angles of either 90° or 45° were 40% of that with double angles of a 30°~45° approach. The yield shear loads obtained from both 90° and 45° nailing approaches were 30 and 47%, respectively, of that with double angles of the 30°~45° approach. Values of initial stiffness were 11 and 35%, respectively, of that with double angles of the 30°~45° approach. Improvement in the shear resistance was found in a butt connection fastened with self-tapping screws when southern pine laminae were used for outer layers of the CLT. CLT connections fastened with self-tapping screws were classified based on the obtained ductility. The connection assembled with a surface spline was classified into the high-ductility category, the CLT butt connection was in the moderate-ductility category, and the CLT half-lap connection was in the low-ductility category.

**Key words:** cross-laminated timber, self-tapping screw, connection, shear resistance.

**Yeh MC, Lin YL, Yen TH, Lin HL. 2019.** Investigation of the shear resistance performance of cross-laminated timber connections with self-tapping screw applications. *Taiwan J For Sci* 34(3):179-95.

### 緒言

直交集成板(cross-laminated timber, CLT)的開發與應用是近幾年世界木材工程國際會議中熱門的題材，也是日本木材學會近年來論文發表的新興重要研究領域。直交集成板之開發源自歐洲，具有高強度高剛性的性質，應用於

木結構有構成簡單、施工工時短有效率、設計簡單，加上可預鑄又具高精準度，尤其適合中高樓層之建築用途而具競爭力，而此產品也行銷全世界。

木質構造的結構安全與穩定性，往往視

其接合之效果而成為關鍵技術，木材構材的接合特性研究也成為重要領域。直交集成板是最新木質結構綠建築之構材，所組成之木質構造建築在各構材之間必須採用適當的接合，因此 CLT 接合技術以及所產生的接合性能，就成為十分重要的關鍵議題。尤其是台灣地處環太平洋地震帶，同時每年之颱風季節所產生之水平側向力，均為木結構設計過程中所不可忽視的設計載重。木結構所承受之設計載重是透過直交集成板所組成的牆體及樓板傳遞至基礎，其中內力的傳遞路徑必須確保接合部位的穩固才能達成，而接合處對可能發生的剪力、拉伸力或壓縮力等相關抵抗性能，必須探究並提供一確切之承載容量，以供設計及施作實務上之需求，在國內以人工林主要的造林樹種木材進行開發之直交集成板，則有必要探討此產品在應用過程之性能及實用性，其中接合方法及相關強度性能的數值評估是迫切需要的。

由於直交集成板之剛性及強度相近於相同厚度之鋼筋混凝土，且僅有其三分之一之質量，Sadeghi and Smith (2014)認為在木質樓板建築材料上具有很大之優勢，並建議為提高組合樓板之強韌性，並防止承受側向載重之扣件可能會造成的板材劈裂，其扣件埋入深度必須超過直交集成板至少 2~3 層。在日本由於製造條件及運輸限制，其直交集成板之開發及應用均以小尺寸為主，故對具有高剪斷性能的直交集成板牆體便需要具有具變形特性的接合機制。Kitamori et al. (2014)研究得到以埋入金屬連結件及插銷(穿孔釘, drift pin)之接合方式可以獲得 30 kN 的降伏強度，並具有高延展性能。同時也發現由於直交集成板的均質性也允許有較小的端距及邊距配置運用。當插銷扣件的邊距調整加大會產生延展變形，對結構會有明顯影響，此顯示了接合細部配置非常重要，能夠明顯的影響接合的效果。

鳩尾樁接合過去是應用於傳統木構造中主構材與次構材間之接合。Stecher et al. (2014)以山毛櫸合板製成鳩尾樁應用於 C18 等級雲杉製成之直交集成板之接合。在剪斷試驗中，破壞均發生在鳩尾樁，並在樁中央產生橫向壓縮破

壞，進而造成兩側邊之橫向拉伸破壞。為了提高拉伸承載容量以及最適化設計，建議可以改變鳩尾樁的角度進行調整各層集成元之剛性，同時，增加樁數量對接合之影響研究有必要再進行，此研究顯示由於木質材料的直交性，在不同木理方向受力下，將會產生明顯的直交集成板接合差異。

Polastri and Angeli (2014)認為有數個關鍵問題會限制直交集成板的技術發展，其中兩項是組合技術的困難度以及不當的接合系統。尤其是目前有許多連結件是經由輕型木構架技術轉換而成，當應用到 6 層高層建築時就會不適用。因此研發一直交集成板牆角專用之 X-RAD 連結件，並使用自攻螺絲固定於由金屬片成型且包覆高比重闊葉樹 LVL (laminated veneer lumber) 之連結系統，透過抗拉伸及剪斷試驗進行各種角度之試驗，結果介於 108~289 kN，剛性介於 9~23.6 kN/mm，所組成之直交集成板牆體經側向力試驗的位移在施力位置僅 16.5 mm。依義大利多風地區之風力及多地震地區的地震力進行模擬，結果 5 層直交集成板建築之關鍵位置所產生之上舉力均遠低於該連結件所設定之 150 kN，只有在 8 層建築案例模擬在強震時超過新型連結件之容量，本研究證實了透過精準的接合設計確能使扣件強度運用達最佳化。

Gavric et al. (2012)曾針對直交集成板建造之一層實體建築進行擬動態試驗，也進行所組成的 3 層建築進行振動台試驗，並於日本之世界最大振動台進行直交集成板 7 層建築試驗，證實了可以承受阪神大地震等級的震度。為了進一步了解標準接合方法的耐震性能，便針對應用於上述三層建物之各種接合，進行了基本的直交集成板單一牆體或相鄰牆體之抗拉伸及剪斷接合之評估，作為模擬整體結構所需之參數。以自攻螺絲接合性能包括強度、剛性、能量散逸、塑性比以及殘留強度。試驗結果亦顯示扣件運用時，要有足夠的間距、端距以及邊距配置以防止脆性破壞，同時，在自攻螺絲之垂直引拔試驗中，顯示其釘頭之穿透破壞模式非常關鍵。在部分發生的脆性破壞模式中，顯示是由於直交集成板之內層產生劈裂或與木纖維剪

斷有關。另外，在相互垂直組合之牆體中，其剪斷性能則不受各層集成元配置方向之影響，本研究說明了木結構系統的整體結構性能仍決定在基本之接合技術，同時接合部的扣件配置考量也影響了接合的效果應加以重視。

Mori et al. (2014)嘗試將大木螺栓連結件應用於比重為 $516 \text{ kg m}^{-3}$ 之直交集成板接合，木材採用E1等級黑雲杉製造。拉伸試驗結果建議當邊距為2倍的扣件直徑距離時，以平行木理方向埋入之強度高於垂直木理方向條件，當邊距為4倍的扣件直徑距離時，呈現垂直木理埋入者優於平行木理埋入者，若接合位置在膠合介面時，其引拔強度則亦介於兩木理方向之接合條件之間，接合剛性則是以平行木理接合優於垂直木理接合。在能量吸收方面則是以垂直木理接合優於平行木理接合。根據接合之強度及破壞模式顯示垂直木理方向之接合邊距宜為4倍的扣件直徑距離，而平行木理方向之接合宜為2倍的扣件直徑距離以上，因此當嘗試開發一新型接合技術時，必須慎重考量到集成板構成之特性可能產生對接合效果的差異。

Richardson and Hindman (2016)針對板-板之接合之整體結構行為是有必要透過剪力牆傳遞剪斷及彎矩力之需求進行接合剪斷試驗，利用2級南方松製造五層直交集成板，分析三種接合方法的性能。結果顯示直交集成板端接時採用#11鍍鋅鋼板配置16d規格普通釘，以16支的接合效果最佳，鋼板可以延遲破壞的發生。以2.0E級LVL為方栓接合配置直徑6.35 mm大木螺釘(lagscrew)條件下，在剪斷過程因單板配向會造成劈裂破壞。以搭接接合採用相同之大木螺釘，其中以10 cm間距、5 cm邊距組合者，在達最大載重後會急速下降。整體而言，LVL方栓接合性能不佳，搭接之接合性能可接受，但扣件之破壞為脆性行為。塑性率方面是方栓優於鋼板，再其次是搭接。最大破壞載重方面是鋼板接合優於LVL方栓，再其次是搭接。降伏強度則是鋼板接合優於搭接，再其次是方栓接合，針對南方松直交集成板之接合性能表現，由於與國產柳杉樹種差異大，值得深入探討。

自攻螺絲在國內之木結構施工接合中為新

型之扣件，在現行之木構造建築物設計及施工技术規範(Ministry of the Interior 2011)之木構材有關接合部設計中，有如前述研究所採用之鐵釘、大木螺釘、穿孔釘等扣件分別有訂定該種扣件在接合處之容許剪力計算程序，而尚未有自攻螺絲的相關接合設計規定。有關自攻螺絲在木結構構材接合之相關研究多以結構用集成材為主(Yeh et al. 2016a, b, 2018a, b)，由於直交集成板具有直交性，扣件受力時需同時考慮木材平行及垂直木理的抵抗作用，與上述以木材單向層積之集成材的受力有所不同而有必要探究。故本研究擬針對國產造林木製造直交集成板，並以自攻螺絲為扣件進行接合，透過剪斷試驗，探討不同接合型式及不同用釘角度對接合剪斷抵抗特性之影響，並探討以南方松為柳杉直交集成板最外層之接合強度提升之效果，作為國內運用自攻螺絲於直交集成板接合設計及施工之參考。

## 材料與方法

### 一、試驗材料

#### (一)木材

採用國產柳杉(*Cryptomeria japonica*; Japanese cedar)造林木，伐自新竹林區管理處竹東第七林班地43年生，及北美進口框組壁結構用製材之 $2 \times 6$ 南方松(*Pinus* spp.; southern pine)。平均含水率為 $15.5 \pm 0.7\%$ ，經刨光、定長後，製成斷面尺寸 $30 \times 110 \text{ mm}$ ，長度 $880 \text{ mm}$ 。柳杉作為CLT表、內層集成元，平均氣乾密度為 $0.48 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$ ，南方松作為異樹種CLT之表層集成元，平均氣乾密度 $0.55 \pm 0.05 \text{ g cm}^{-3}$ 。

#### (二)結構用合板

使用歐洲落葉松製成之結構用合板，裁切成 $440 \times 160 \times 18 \text{ mm}$ ，作為CLT接合之方栓。

#### (三)金屬扣件

使用三種全螺牙自攻螺絲，直徑均為 $8 \text{ mm}$ ，長度分別為 $140$ 、 $200$ 、 $280 \text{ mm}$ ，如



Fig.1所示，型號為M8.0×140、M8.0×200、M8.0×280(舜倡發股份有限公司)。

#### (四)膠合劑

採用間苯二酚-酚-甲醛樹脂(resorcinol phenol formaldehyde resin, RPF)，型號為D40(木膠股份有限公司)，硬化劑為粉狀聚甲醛，使用時主劑與硬化劑比例為100：15，混和後之可使用時間為30 min，常溫硬化時間為6小時。

### 二、試驗儀器與設備

#### (一)強度試驗機

最大載重容量50 ton，機台尺寸8000(長)×1700(寬)×4000 mm(高)，萬匠企業股份有限公司製造。

#### (二)萬能試驗機

最大載重容量10 ton，高鐵科技股份有限公司。

#### (三)油壓台

油壓缸半徑280 mm，最大操作壓力為300 ton。

#### (四)打音分析(Tap tone analysis)

使用軟體Fast Fourier Vibration Analyzer(FFT analyzer, Fakopp Enterprise, 匈牙利)，常態頻率設定為442 Hz，搭配使用設備為筆記型電腦、敲擊器、麥克風(接收頻率範圍

100~16,000 Hz，靈敏度為 $38 \pm 2$  dB，信噪比 > 60 dB)。

#### (五)加工製備設備

氣動裁斷機、自動縱剖機、四面刨、圓鋸機、裝潢鋸台、垂直鑽孔機、手提電鑽、手提圓鋸。作為CLT及CLT集成元之定長、定寬、定厚、開槽、鑽孔等備料及扣件接合之加工。

### 三、試驗方法

#### (一)試驗設計

利用國產柳杉及南方松，分別製造全柳杉CLT及表層為南方松集成元之異樹種CLT兩種。CLT試體之接合方式區分為方栓接合、搭接、及對接三種。接合時用釘方式又區分為直釘、斜釘、以及複斜等三種。CLT之接合條件如Table 1所示。

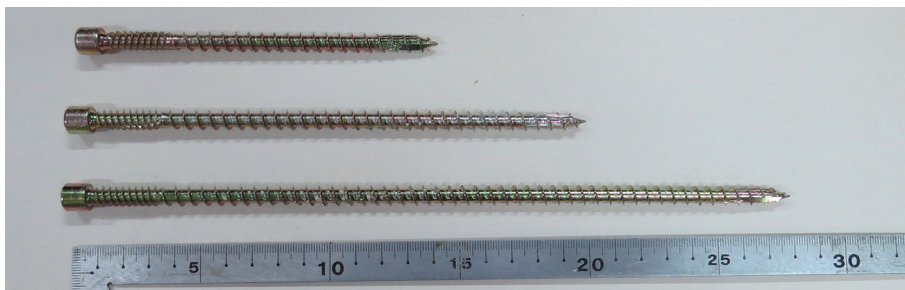
#### (二)CLT製作

##### 1.集成元等級區分

集成元首先測定體積及材重計算密度後，以打音頻譜分析法進行縱向共振頻率測定，並計算木材動彈性模數，作為集成等級區分之依據，區分成動彈性模數6.0~12.5 GPa。

##### 2.CLT配置製作

參考日本農林規格JAS 3079 (2013)，製作五層五單片之CLT，配置採A類構成之對稱異等



**Fig. 1. Self-tapping screws designed for wood-frame construction (from top to bottom M8.0×140, M8.0×200, M8.0×280).**

**Table 1. Experimental design of cross-laminated timber (CLT) connections**

Type of connection	Type of CLT	Penetration angle of STSs	Type of STS <sup>1)</sup>
Surface spline connection	<i>Cryptomeria japonica</i>	90°	Ø8 mm 140 mm
		45°	Ø8 mm 140 mm
	<i>Pinus spp. - C. japonica</i>	90°	Ø8 mm 140 mm
		45°	Ø8 mm 140 mm
Half-lap connection	<i>C. japonica</i>	90°	Ø8 mm 140 mm
		45°	Ø8 mm 200 mm
	<i>Pinus spp. - C. japonica</i>	90°	Ø8 mm 140 mm
		45°	Ø8 mm 200 mm
Butt connection	<i>C. japonica</i>	30° and 45°	Ø8 mm 280 mm
	<i>Pinus spp. - C. japonica</i>	30° and 45°	Ø8 mm 280 mm

<sup>1)</sup> STSs, self-tapping screws.

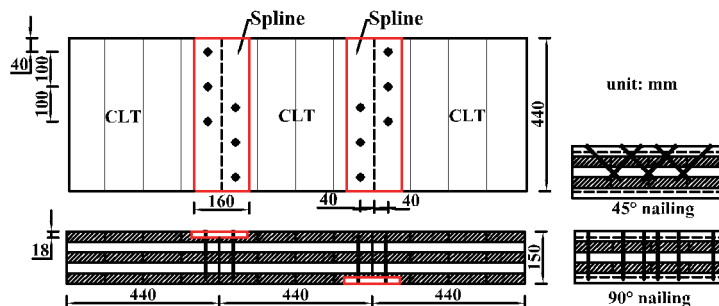
級。柳杉CLT之上下外層之平行層使用動彈性模數11.0 GPa等級集成元，直交之第2、4層採用動彈性模數10.0 GPa，中間平行層採用動彈性模數6.0 GPa。在該標準中柳杉屬E5類樹種群，上述外層集成元可視為M60A等級，故所製之CLT相當於異等級構成之M×60-5-5等級。異樹種CLT之上下外層之平行層使用動彈性模數12.5 GPa之南方松集成元，其餘各層採用柳杉集成元，其等級配置則與上述柳杉CLT相同。集成元膠合層積時，RPF塗佈量為250 g m<sup>-2</sup>，集成元窄面之間於拼板時未施予膠合劑，加壓壓力為0.98 MPa，或是油壓機台錶壓3.04 MPa，持壓時間6小時，CLT尺寸為880 (長)×880 (寬)×150 mm (厚)。

### (三)CLT接合設計

將製作完成之CLT鋸製成440×440×150

mm之試片，每三片試片進行接合成試體，接合方式區分成方栓接、搭接以及對接並形成2個接合界面。進行方栓接合時，CLT先行銑槽再將方栓埋入CLT銜接處，方栓再以140 mm之自攻螺絲鎖入CLT，其釘入方向區分為直釘90°及斜釘45°，如Fig. 2所示，每一方栓共採用6支自攻螺絲固定，用釘位置在各CLT試片之邊距、端距以及各自攻螺絲之間距，均參考木構造建築物設計及施工技術規範(Ministry of the Interior 2011)有關大木螺絲使用之建議進行扣件配置設計。

CLT之搭接設計是在中央之CLT兩側進行120 mm寬度及75 mm深度之搭接，3片CLT組成2個接合界面如Fig. 3所示。自攻螺絲鎖入CLT進行接合時，區分為直釘及斜釘2種方式，直釘採用140 mm長度之自攻螺絲，斜釘採用200 mm長度且釘入角度與材面呈45°。每組



**Fig. 2. Surface spline connections of cross-laminated timber (CLT) with self-tapping screws with vertical and 45° installations.**

CLT試體以12支組合，用釘位置參考規範之建議如Fig. 3所示。

CLT之對接設計時，自攻螺絲採用複斜方式使用釘，分別與材面呈30°並與集成元之木理方向呈45°釘入接合部位，如Fig. 4所示，自攻螺絲長度採280 mm。每一接合剪斷面使用6支自攻螺絲。

(四)CLT接合剪斷試驗

以3片CLT依上述5種接合設計，分別進行組合成具有2個接合剪斷面的試體，CLT又區分為全柳杉及南方松-柳杉異樹種CLT2種，合計10種試驗條件進行接合剪斷試驗，每1條件重複4次。試驗時載重施於中央CLT，兩側之CLT置於支點上，形成接合抵抗之剪斷面。每組試驗時間5~10分鐘，方栓接合、搭接、對接條件之載重速度分別為500、2000、及2500 kgf min<sup>-1</sup>。試驗結果採用日本住宅·木材技術中心(The

Japan Housing and Wood Technology Center 2001)之分析軟體分析接合之剪斷載重-位移關係，求得CLT自攻螺絲之接合強度特性。

結果

一、接合剪斷之破壞模式

(一)CLT之方栓接合

CLT透過方栓以90°之直釘鎖入接合之方式，自攻螺絲頭在受力過程中，於方栓面板產生明顯沉陷穿脫如Fig. 5所示，同時在方栓與CLT之界面，自攻螺絲產生彎曲變形，此種扣件彎曲降伏型式屬於模式I (32%)及IIIs (64%) (NDS 1997)，如Table 2所示；方栓以45°斜釘鎖入接合時，自攻螺絲在受力過程中，方栓致使其被引拔且部分彎曲變形產生模式I (19%)及IIIs

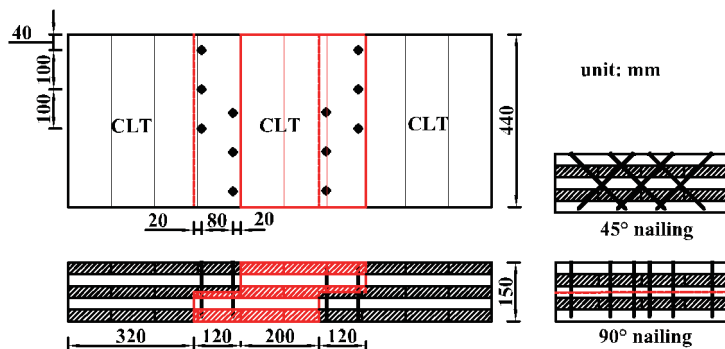


Fig. 3. Half-lap connections of cross-laminated timber (CLT) with self-tapping screws with vertical and 45° installations.

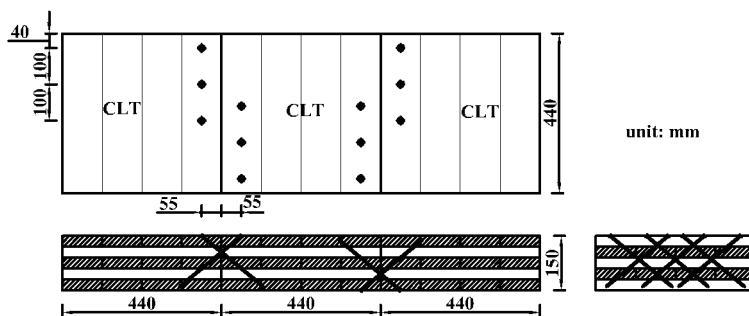


Fig. 4. Butt connections of cross-laminated timber (CLT) with self-tapping screws with double installation nailing.

(82%)之塑性鉸，並使得螺絲頭明顯折彎。甚至部分釘頭斷裂分離。同時兩種用釘方式之CLT接合界面均有鬆脫分離之現象。

### (二)CLT之搭接接合

CLT在搭接處以自攻螺絲90°直釘固定之方式，於受力過程中，中間層之集成元均在釘孔位置受到壓縮而沿木理方向形成剪斷劈裂之木塊自端部推出，如Fig. 6所示。第二種破壞



Fig. 5. Self-tapping screw head penetrating through the spline at the connection.

是自攻螺絲頭沉陷於CLT材面，第三種破壞則是CLT在接合界面之鬆脫分離。自攻螺絲在接合界面發生彎曲降伏模式I佔16%及模式IV佔84%，如Table 3所示。

CLT在搭接處以45°斜釘固定之方式，在受力破壞過程中主要是形成CLT之間的鬆脫分離；其次是第二或第四層垂直層之集成元在剪斷滑動過程中，端部因擠壓而劈裂；第三種則是自攻螺絲之釘頭沉陷材面，並以柳杉材為主，在南方松材較不易產生沉陷，在接合界面發生之扣件降伏模式I佔58%及模式IV佔27%。

### (三)CLT之對接接合

CLT於對接時，自攻螺絲取複斜30°及45°方式固定，在剪斷破壞的主要模式有兩種，亦即自攻螺絲之釘頭均沉陷材面以及CLT在接合界面形成鬆脫分離(Fig. 7)。部位接合處則亦可見第二或第四垂直層之集成元端部因擠壓而劈裂。自攻螺絲彎曲降伏模式屬於模式I佔94%及模式IV佔6% (Table 4)。

## 二、CLT接合之剪斷抵抗性質

本試驗之試體以三片CLT組合，在載重過程中形成兩個接合剪斷面，試驗結果換算成單剪接合面進行分析，剪斷試驗所得各CLT接合條件之載重位移關係，依日本住宅與木材技術中心所建議之程序進行評估，並利用接合分析軟體求得接合最大剪斷破壞容量( $P_{max}$ )、剪斷降伏載重( $P_y$ )、降伏位移( $\delta_y$ )、極限降伏位移( $\delta_u$ )、 $0.8 P_{max}$ 之極限降伏位移( $\delta_u$ )、初始剛性(K)、塑

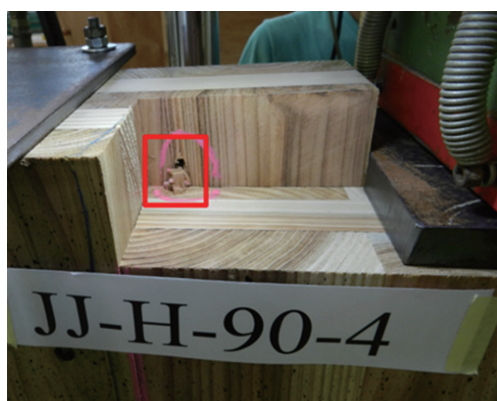
Table 2. Percentage of failure types of self-tapping screw in cross-laminated timber (CLT) surface spline connections during shear tests

Failure type	<i>Cryptomeria japonica</i> CLT		Mixed CLT	
	90° nailing	45° nailing	90° nailing	45° nailing
Screw head indentation	100%	25%	100%	50%
Screw head withdrawal	0	100%	0	100%
CLT separation	100%	100%	100%	100%
Yield mode I	40%	31%	23%	6%
Yield mode IIIs	50%	69%	77%	94%
Screw broken (piece)	0	17	0	30%



**Table 3. Percentage of failure types of self-tapping screws in cross-laminated timber (CLT) half-lap connection during shear tests**

Failure type	Cryptomeria japonica CLT		Mixed CLT	
	90° nailing	45° nailing	90° nailing	45° nailing
Screw head indentation	100%	50%	50%	25%
CLT separation	75%	100%	100%	100%
Split at 3rd parallel layer	100%	0	100%	0
Split at 2nd/4th cross layer	0	25%	0	0
Yield mode I	10%	52%	21%	63%
Yield mode IV	89%	29%	79%	25%



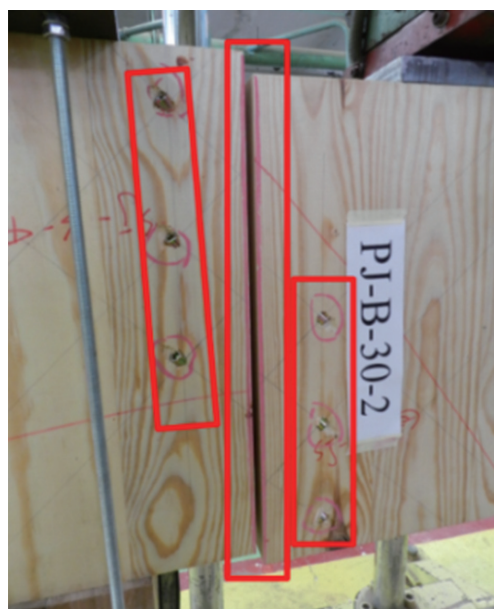
**Fig. 6. Wood block was pushed out by the self-tapping screw when the 3rd parallel layer split at the half-lap connection.**

性率( $\mu$ )、構造特性(D<sub>s</sub>)及能量散逸(U)等特性。

(一)CLT方栓接合之剪斷抵抗特性

Figure 8顯示柳杉CLT方栓接合條件在剪斷抵抗下之載重位移關係，在自攻螺絲以90°組合固定條件有較高之剪斷抵抗，在45°斜釘固定條件則有大量的剪斷變形或位移，南方松-柳杉混合樹種CLT之方栓接合亦有相同之趨勢。

經轉換成單剪斷面接合進行分析之剪斷接合特性如Table 5所示。CLT方栓接合以90°用釘固定之最大剪斷破壞載重高於以45°斜釘固定之接合效果約86%。在極限位移則是45°斜釘方式高於90°直釘112%。接合大幅滑動的結果，使得45°斜釘固定之CLT方栓接合的塑性率是90°直釘固定之3.6倍。



**Fig. 7. Screw heads indenting the cross-laminated timber (CLT) surface, and CLT panels having separated from the CLT butt connection.**

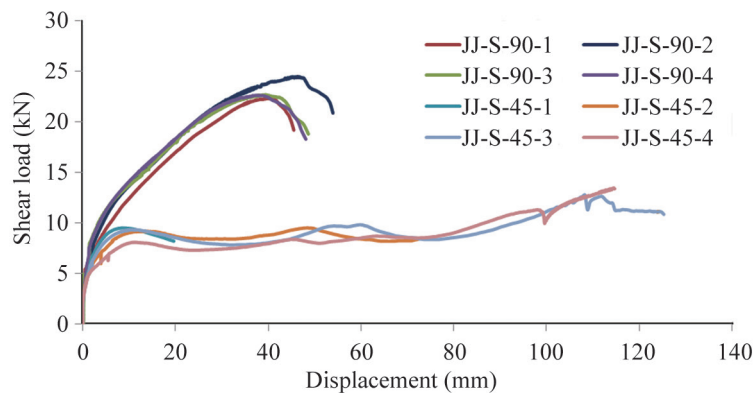
(二)CLT搭接之剪斷抵抗特性

Figure 9顯示柳杉CLT利用自攻螺絲固定之搭接條件，在剪斷試驗於剪斷面之載重位移關係，在自攻螺絲以45°固定之接合有較高之剪斷抵抗，在90°直釘固定之接合則有較高之剪斷變形或位移。南方松柳杉混合樹種CLT之搭接剪斷試驗結果亦有相同之趨勢。

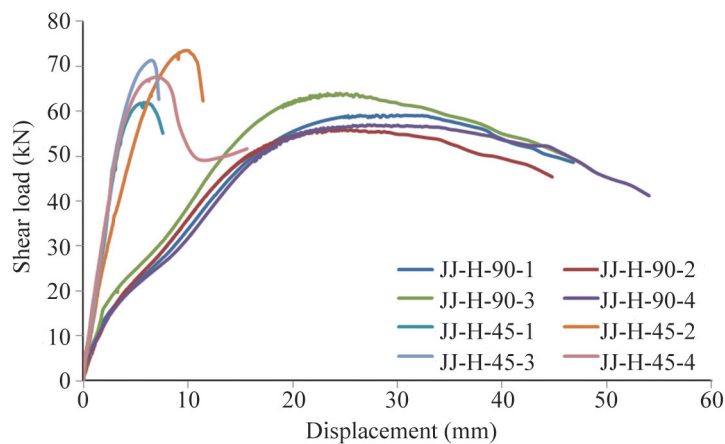
經轉換成單剪斷面接合進行分析，其剪斷接合特性如Table 6所示。CLT之搭接以自攻螺

**Table 4. Percentage of failure types of self-tapping screws in cross-laminated timber (CLT) butt connections during shear tests**

Failure type	<i>Cryptomeria japonica</i> CLT	
	Double angle nailing	Mixed CLT
Screw head indentation	100%	100%
CLT separation	100%	100%
Split at 2nd/4th cross layer	50%	100%
Yield mode I	92%	96%
Yield mode IV	8%	4%



**Fig. 8. Shear load-displacement relationship of *Cryptomeria japonica* cross-laminated timber (CLT) surface spline connection fastened with self-tapping screws in 90° and 45° nailing approaches. (JJ, *C. japonica* CLT; S, surface spline connection; 90/45, penetration angle).**



**Fig. 9. Shear load-displacement relationship of *Cryptomeria japonica* cross-laminated timber (CLT) half-lap connection fastened with self-tapping screws with 90° and 45° nailing approaches. (JJ, *C. japonica* CLT; H, half-lap connection; 90/45, penetration angle).**

**Table 5. Properties of shear resistance in cross-laminated timber (CLT) surface spline connections with 90° and 45° nailing approaches**

Type		$P_{max}^{1)}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\delta_v$ (mm)	K (kN mm <sup>-1</sup> )	U (kN mm)	$D_s$	$\mu$
JJ <sup>2)</sup> -S-90	Max	24.45	11.34	6.72	53.94	12.41	2.55	1016.72	0.40	6.43
	Min	22.31	10.47	4.17	45.51	7.57	1.56	760.07	0.29	3.67
	Avg	23.01	10.79	5.31	49.05	9.76	2.11	875.84	0.33	5.25
	SD	0.98	0.38	1.23	3.54	2.34	0.46	105.78	0.05	1.23
JJ-S-45	Max	13.51	8.84	7.85	125.27	9.61	4.05	1167.48	0.24	33.64
	Min	9.49	4.97	1.24	72.33	2.15	0.97	1229.30	0.12	12.06
	Avg	11.30	6.66	4.30	104.50	5.34	2.58	937.66	0.19	20.86
	SD	2.12	1.86	3.53	28.25	3.77	1.68	287.95	0.05	11.33
PJ-S-90	Max	20.23	10.05	5.66	62.18	9.72	2.25	1000.62	0.34	7.20
	Min	19.38	9.26	4.27	38.82	7.53	1.78	563.72	0.27	4.79
	Avg	19.77	9.67	4.85	51.40	8.50	2.01	801.74	0.30	6.08
	SD	0.41	0.33	0.59	9.60	0.93	0.20	180.05	0.03	1.21
PJ-S-45	Max	15.17	8.14	6.90	132.55	8.07	3.47	1211.82	0.18	30.95
	Min	8.90	5.18	1.49	67.32	2.17	1.08	499.36	0.13	15.56
	Avg	11.69	7.16	5.25	108.77	6.01	1.77	910.11	0.16	20.39
	SD	2.59	1.35	2.52	29.25	2.62	1.13	307.53	0.02	7.15

<sup>1)</sup>  $P_{max}$ , maximum shear capacity at failure;  $P_y$ , yield shear load;  $\delta_y$ , yield displacement;  $\delta_u$ , ultimate displacement at 0.8  $P_{max}$ ;  $\delta_v$ , ultimate yield displacement; K, initial stiffness; U, energy dissipation;  $D_s$ , structural characteristic factor;  $\mu$ , ductility factor.

<sup>2)</sup> JJ, *Cryptomeria japonica* CLT; PJ, *Pinus-C. japonica* CLT; S, surface spline. Max, maximum; Min, minimum, Avg, average; SD, standard deviation.

絲45°斜釘固定之最大剪斷破壞載重優於90°直釘固定之接合效果約20%，極限值移則是90°直釘固定方式為45°斜釘方式之5.5倍。接合之大幅塑性變形，使得90°直釘固定之能量散逸是45°斜釘之5倍。

(三)CLT對接之剪斷抵抗特性

Figure 10 顯示柳杉CLT以及混合樹種CLT分別利用自攻螺絲進行對接之條件，在剪斷試驗於之載重位移關係，柳杉CLT之對接有較大之剪斷位移，而南方松-柳杉混合CLT之對接則有較高之剪斷承載效果。經轉換成單剪斷面接合進行分析，其剪斷接合特性如Table 7所示。南方松-柳杉混合CLT採用自攻螺絲以複斜方式用釘進行對接者，其最大剪斷破壞載重高於柳杉CLT對接條件者23%。

討論

一、CLT接合之剪斷破壞

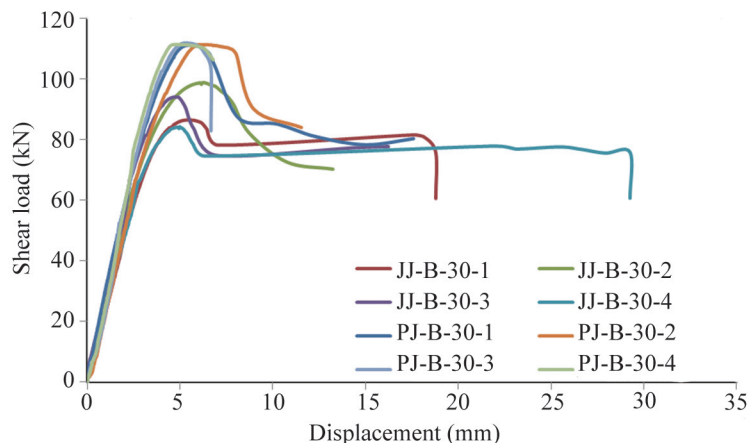
CLT之接合在剪斷試驗中，Hossain et al. (2016b)將自攻螺絲以90°直釘鎖入CLT時視為承受剪斷力(Shear)，以斜釘鎖入CLT時視為引拔受力(withdrawal)，並可能因方向不同而受拉埋入CLT或是受壓而推出CLT；以複斜方式鎖入CLT時，則兼具剪斷力及引拔力之綜合作用。在該研究中CLT之方栓接合在破壞時，除了發生CLT鬆脫分離，另自攻螺絲扣件亦產生降伏變形，但該研究中未進一步區分降伏模式。有關模式I之降伏係指扣件變形少，而在釘著部位之木材產生壓潰變形，在本試驗方栓以直釘固定時發生模式I破壞之現象較斜釘方式為高，因此方栓材面有明顯產生被釘頭沉陷壓潰之破壞。模式III之降伏則是自攻螺絲在受力變形時

**Table 6. Properties of shear resistance in cross-laminated timber (CLT) half-lap connections with 90° and 45° nailing approaches**

Type		$P_{\max}^{1)}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\delta_v$ (mm)	K (kN mm <sup>-1</sup> )	U (kN mm)	$D_s$	$\mu$
JJ <sup>2)</sup> -H-90	Max	63.96	31.05	9.07	54.02	16.48	4.14	2447.80	0.46	3.46
	Min	56.06	27.10	6.90	44.78	13.34	3.30	1995.80	0.41	2.84
	Avg	59.02	29.13	7.94	48.61	15.01	3.70	2264.51	0.43	3.25
	SD	3.54	2.01	0.97	3.97	1.53	0.40	219.34	0.02	0.28
JJ-H-45	Max	73.53	90.81	4.50	15.64	5.81	16.47	796.89	0.78	4.49
	Min	61.94	38.96	2.79	7.21	3.48	11.84	339.91	0.35	1.33
	Avg	68.60	61.49	3.60	10.47	4.75	14.28	517.68	0.58	2.39
	SD	5.07	23.73	0.74	3.94	1.06	1.90	218.51	0.17	1.42
PJ-H-90	Max	60.11	36.82	12.57	49.53	19.58	3.81	2094.34	0.52	3.76
	Min	51.38	24.76	6.81	43.33	13.19	2.93	1987.99	0.39	2.35
	Avg	57.34	30.66	8.86	45.79	15.54	3.54	2053.68	0.45	3.02
	SD	4.02	4.94	2.54	2.71	2.79	0.42	46.16	0.05	0.58
PJ-H-45	Max	76.60	64.97	3.91	7.96	4.73	19.94	439.94	0.72	1.95
	Min	63.90	44.80	2.39	5.75	3.41	16.04	238.64	0.59	1.46
	Avg	70.72	51.20	2.92	6.82	3.91	17.75	338.25	0.64	1.76
	SD	5.44	9.27	0.71	0.92	0.58	1.77	82.39	0.06	0.23

<sup>1)</sup>  $P_{\max}$ , maximum shear capacity at failure;  $P_y$ , yield shear load;  $\delta_y$ , yield displacement;  $\delta_u$ , ultimate displacement at 0.8  $P_{\max}$ ;  $\delta_v$ , ultimate yield displacement; K, initial stiffness; U, energy dissipation;  $D_s$ , structural characteristic factor;  $\mu$ , ductility factor.

<sup>2)</sup> JJ, *Cryptomeria japonica* CLT; PJ, *Pinus-C. japonica* CLT; H, half-lap connection. Max, maximum; Min, minimum; Avg, average; SD, standard deviation.



**Fig. 10. Shear load-displacement relationship of butt connection assembled using self-tapping screws for *Cryptomeria japonica* cross-laminated timber (CLT) and mixed-species CLT. (JJ, *C. japonica* CLT; PJ, mixed-species CLT; B, butt connection; 30, double penetration angle of 30° and 45°).**

**Table 7. Properties of shear resistance in cross-laminated timber (CLT) butt connections**

Type		$P_{max}^{1)}$ (kN)	$P_y$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\delta_v$ (kN mm <sup>-1</sup> )	K (kN mm)	U	$D_s$	$\mu$
JJ2)-B-30	Max	98.72	91.13	3.41	29.25	3.64	27.07	2121.24	0.36	9.06
	Min	84.15	59.59	2.20	13.24	3.08	22.23	976.56	0.24	4.29
	Avg	90.81	71.82	2.89	19.38	3.30	24.46	1411.64	0.32	5.88
	SD	6.74	13.62	0.53	6.96	0.24	2.03	500.08	0.05	2.15
PJ-B-30	Max	111.79	70.40	3.58	17.59	3.97	28.93	1426.00	0.65	5.67
	Min	111.07	54.56	2.14	6.66	3.10	25.27	507.30	0.31	1.70
	Avg	111.34	62.13	2.70	10.63	3.64	27.72	850.54	0.50	3.05
	SD	0.31	6.48	0.64	5.17	0.39	1.68	432.39	0.15	1.84

<sup>1)</sup>  $P_{max}$ , maximum shear capacity at failure;  $P_y$ , yield shear load;  $\delta_y$ , yield displacement;  $\delta_u$ , ultimate displacement at  $0.8 P_{max}$ ;  $\delta_v$ , ultimate yield displacement; K, initial stiffness; U, energy dissipation;  $D_s$ , structural characteristic factor;  $\mu$ , ductility factor.

<sup>2)</sup> JJ, *Cryptomeria japonica* CLT; PJ, *Pinus-C. japonica* CLT; B, butt connection. Max, maximum; Min, minimum; Avg, average; SD, standard deviation.

產生1個塑性鉸，發生部位在CLT，本試驗當方栓以斜釘固定者多發生模式III之降伏，自攻螺絲除彎曲外，亦會受引拔拉出材面。

在CLT搭接之剪斷試驗方面，Gavric et al. (2015)提出自攻螺絲受力會彎曲並形成一個塑性鉸，其位置在釘尖側之主構材，屬於歐洲降伏模式，或是相當於NDS之模式III。本研究在自攻螺絲90°直釘固定的方式下，主要的變形為降伏模式IV，自攻螺絲產生2個塑性鉸，亦即分別發生在搭接之接合界面位置的主構材及側構材。不同點是在該研究之CLT並未發生木材劈裂之脆性破壞，反而是部分自攻螺絲發生斷裂，本研究之CLT構材則發生劈裂，可能因此形成間隙而容許自攻螺絲進一步彎曲變形，也未見有斷裂現象發生。此除了不同CLT樹種材質差異有影響外，Gavric et al. (2015)亦建議可自用釘配置之邊距與端距配置改善可能之脆性破壞。

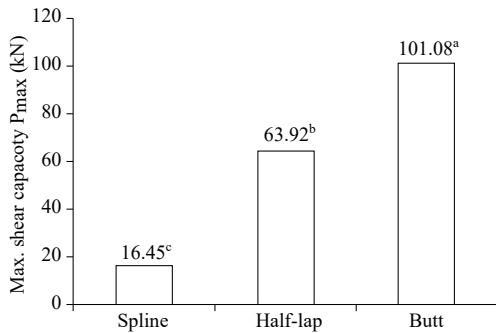
在CLT對接之剪斷試驗方面，Danzig et al. (2014)及Hossain et al. (2016a)亦採用自攻螺絲複斜方式進行接合，破壞時均未見明顯之CLT劈裂，自攻螺絲也未有明顯引拔及斷裂，而Hossain et al. (2016b)則發現自攻螺絲在降伏變形時，會壓潰CLT且造成接合鬆脫分離，本研究之CLT構材也因壓潰變形以致劈裂而形成以降伏模式I為主的破壞，此與後者之研究結果相近。

## 二、CLT接合型式對接合剪斷之影響

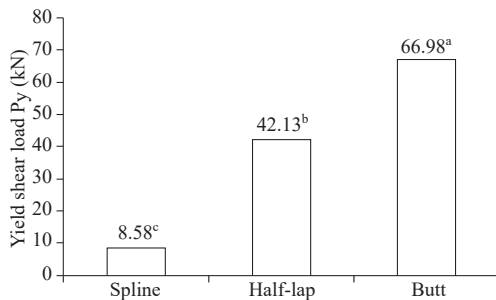
國產柳杉CLT及混合南方松之CLT以直徑8 mm自攻螺絲為扣件進行不同型式之接合，在最大破壞剪斷容量及降伏剪斷載重均顯示對接方式明顯優於搭接及方栓接合方式。其中採用18 mm結構用合板作為方栓接合者分別僅為對接方式之16及13%，也僅為搭接方式之26及20% (Figs. 11, 12)。由於歐洲雲杉結構用合板在剪斷過程有明顯破壞，造成剪斷抵抗效果不佳。Hossain et al. (2016b)發現以25 mm厚之花旗松合板為方栓之CLT接合，較19 mm厚者之 $P_{max}$ 及 $P_y$ 為高，但仍不及對接方式之效果。Gavric et al. (2015)採用28 mm厚之LVL為方栓進行CLT之接合時，其 $P_{max}$ 及 $P_y$ 分別高於CLT之對接方式40及50%。Sadeghi and Smith (2014)採用19 mm厚花旗松合板作為方栓，其接合剪斷抵抗在 $P_{max}$ 及 $P_y$ 方面分別僅為搭接之56及57%，另在該研究中方栓釘頭部分增加墊片固定後，接合之 $P_{max}$ 及 $P_y$ 分別可改善52及89%而有具體效果，依上述研究可見，方栓之材質、厚度的選擇以及用釘方式均會影響CLT接合強度特性。

方栓接合主要是在CLT建築結構中應用於樓板系統之構成，透過方栓接合將CLT樓板組成具有剛性之版結構體。經變異數統計分析(ANOVA)亦顯示CLT以方栓接合之剪斷初始剛性較低，分

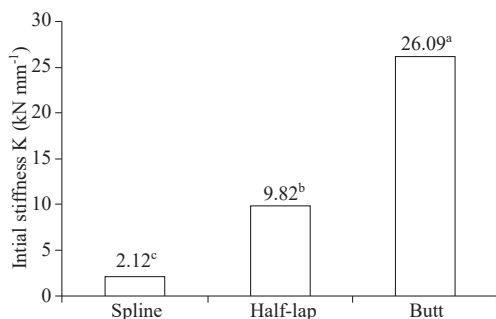




**Fig. 11. Comparison of maximum shear capacities among cross-laminated timber (CLT) connections fastened with self-tapping screws. (Tukey's HSD,  $\alpha = 0.05$ ,  $a > b > c$ ).**



**Fig. 12. Comparison of yield shear loads among cross-laminated timber (CLT) connections fastened with self-tapping screws. (Tukey's HSD,  $\alpha = 0.05$ ,  $a > b > c$ ).**



**Fig. 13. Comparison of the initial stiffness among cross-laminated timber (CLT) connections fastened with self-tapping screws. (Tukey's HSD,  $\alpha = 0.05$ ,  $a > b > c$ ).**

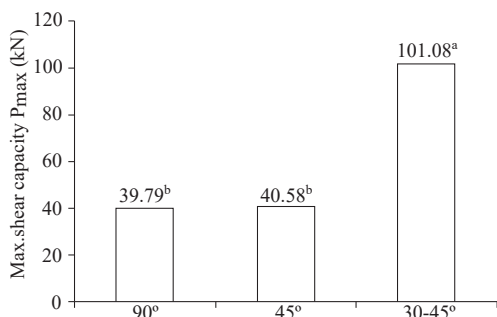
別為搭接及對接方式之8及22% (Fig. 13)。Hossain et al. (2016b)之研究中並未顯示出25 mm厚合板方

栓有較19 mm厚之方栓高之初始剛性，但均較搭接與對接方式為低。Gavric et al. (2015)以28 mm厚LVL為方栓之CLT接合剪斷初始剛性則為搭接方式之68%。Sadeghi and Smith (2014)則透過3 mm(厚)×19 mm(直徑)之墊片補強自攻螺絲之穿透抵抗，可分別提高方栓及搭接方式之初始剛性9及26%，綜合以上所述，CLT以方栓接合之初始剛性均較其他接合方式為低。

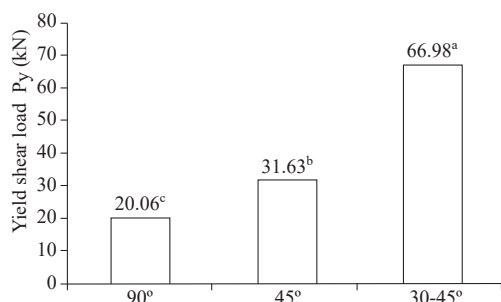
### 三、CLT接合釘接角度對接合剪斷之影響

以自攻螺絲為接合扣件時，其鎖入木材的角度不同，對於所於力的傳遞或是對外力抵抗之機制不同。試驗中自攻螺絲對CLT接合鎖入的用釘方法區分為90°直釘、45°斜釘以及30~45°雙向斜角度之複斜用釘三種方式。結果顯示在最大破壞剪斷容量方面，以複斜固定之接合效果最優，而90°直釘及45°斜釘接合方式則僅為其40% (Fig. 14)。以90°直釘及45°斜釘之接合間其效果相近，但進一步區分搭接之直釘與斜釘固定方式時，以45°斜釘接合之 $P_{max}$ 則高於90°直釘接合者20%，且在統計上有顯著差異；另外CLT以方栓接合者則顯示直釘接合之 $P_{max}$ 明顯高於斜釘86%。兩種接合之用釘方式各有不同的接合剪斷抵抗效果，可能是當方栓以自攻螺絲斜釘鎖入材面時，螺絲頭對材面已形成局部木材壓潰，對於薄方栓而言影響較嚴重，相對的在厚實木進行搭接時，螺絲頭埋入材面的影響則較輕微，前述之方栓接合的嚴重破壞現象亦可說明斜釘在方栓接合可能形成的負面效果。Hossain et al. (2016b)分別在3及5層CLT之接合剪斷試驗中，亦發現當自攻螺絲以引拔方式受力(斜釘)之 $P_{max}$ 較以剪斷方式受力(直釘)者分別高出10~45%。在該研究中直釘接合效果偏低亦可歸因於採用方栓之接合，針對CLT之搭接，則改用斜釘方式對剪斷抵抗的改善效果並不明顯。

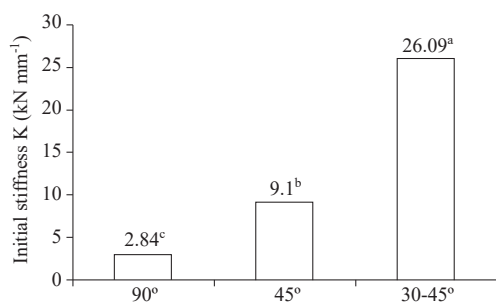
在CLT接合之降伏剪斷載重方面，則顯示自攻螺絲以複斜固定方式高於斜釘方式112%，高於直釘方式234% (Fig. 15)。進一步分別探討方栓接合及搭接之用釘方式對 $P_y$ 之影響，其趨勢與 $P_{max}$ 相同，亦即CLT以45°斜釘搭接之 $P_y$ 高



**Fig. 14. Comparison of the maximum shear capacity among cross-laminated timber (CLT) connections with different nailing angles. (Tukey's HSD,  $\alpha = 0.05$ ,  $a > b$ ).**



**Fig. 15. Comparison of yield shear loads among cross-laminated timber (CLT) connections with different nailing angles. (Tukey's HSD,  $\alpha = 0.05$ ,  $a > b > c$ ).**



**Fig. 16. Comparison of initial stiffness levels among cross-laminated timber connections with different nailing angles. (Tukey's HSD,  $\alpha = 0.05$ ,  $a > b > c$ ).**

於90°接合方式89%，且在統計上有顯著差異；而CLT以直釘進行方栓接合者高於以斜釘方式接合之48%。Hossain et al. (2016b)在CLT搭接

之剪斷試驗中亦顯示斜釘固定方式之P<sub>y</sub>高於直釘固定之結果，同時自攻螺絲複斜固定方式可獲得更佳之降伏剪斷抵抗效果。Hossain et al. (2016a)亦建議在CLT對接時自攻螺絲以複斜方式固定，具有低加工組成本之優點，且證實可為CLT作為側向載重抵抗系統時之接合法。

在CLT接合之初始剛性方面，各接合條件之間顯示自攻螺絲以複斜固定方式最高，且為斜釘方式之2.9倍，又優於直釘方式且為其9.2倍 (Fig. 16)。此說明自攻螺絲以傾斜角度埋入木材後，接合部位所承載之外力將會自原有之剪斷抵抗，改為自攻螺絲軸向之傳遞而成為引拔之形式，而透過螺牙嵌入木材組織以及螺絲頭在材面的承壓抵抗，可以有效抑制接合介面之滑動而改善剛性(Bejtka and Blaβ 2002)。在直釘固定之接合中，自攻螺絲之釘身容易在CLT介面彎曲變形或是釘身直接壓潰局部之木材，形成偏低之剛性。Hossain et al. (2016b)的研究中亦顯示出斜釘及複斜用釘之CLT接合初始剛性均為直釘方式條件之10倍的效果，並歸納為自攻螺絲所形成之引拔力作用。

#### 四、不同樹種CLT對接合剪斷抵抗之影響

在試驗中南方松-柳杉混合樹種CLT是以南方松集成元作為CLT製造時之外層(表底層)配置，透過南方松之較高密度材質及強度以改良原為柳杉CLT之性質。經剪斷試驗結果顯示，以自攻螺絲進行之接合強度性質中，南方松-柳杉CLT在方栓接合及搭接型式之P<sub>max</sub>、P<sub>y</sub>及K等性質上均與柳杉CLT接合相近，僅在對接型式中南方松-柳杉CLT條件之最大剪斷破壞容量及初始剛性分別高於柳杉CLT接合者23及13%。在方栓接合方面，由於CLT表層需開槽18 mm深度以容納方栓，而表層南方松集成元厚度為30 mm，經開槽後在接合部位之南方松所剩實際厚度或許已不再具有改善材質之效果。同時本試驗所採用之柳杉平均密度為0.48 g cm<sup>-3</sup>，南方松平均密度為0.55 g cm<sup>-3</sup>，兩者相差亦不大也可能是因素之一。在搭接方面，在接合處之CLT均開槽至板厚度的二分之一，故搭接之界面是在CLT之內層位置，亦即均為柳杉集成元並用以

承載剪斷抵抗，CLT表層之南方松集成元的改善作用亦受限。

### 五、CLT接合之塑性率

在耐震設計及考慮到受力時木結構系統內力之再分配作用時，結構材之延展性成為一重要考量，CLT為一高剛性結構材，不易形成塑性鉸行為，因此接合部位之延展性成為CLT結構體之一重要特性。塑性率( $\mu$ )可定義為接合部位之降伏位移( $\delta_y$ )與極限位移( $\delta_u$ )之比值，亦即在彈性行為內之位移以及在塑性變形行為位移之間的關係。Brühl and Kuhlmann (2012)依塑性率區分以扣件接合之延展性類別，其中以 $\mu \leq 2$ 視為脆性， $2 < \mu \leq 4$ 為低延展性， $4 < \mu \leq 6$ 為中度延展性， $\mu > 6$ 為高延展性，而Smith et al. (2006)亦採用此類別作為試驗之破壞模式分類。將Tables 5~7依此分類，本研究中CLT以方栓接合者多屬於高延展性之接合，尤其是以45°斜釘固定方式之延展性行為更高。CLT搭接者則以低延展性行為為主，其中南方松-柳杉CLT以45°斜釘者呈脆性接合。至於對接以自攻螺絲複斜方式固定的場合，柳杉CLT之接合屬於中度延展性行為，南方松-柳杉CLT之接合則呈低延展性行為。

### 結論

本研究利用國產柳杉造林木製造CLT，並考慮南方松之混合配置，探討不同CLT接合方式及自攻螺絲不同角度用釘方式對接合剪斷抵抗之特性，所得結論說明如下：

在CLT接合之型式方面，有關接合之最大剪斷破壞容量、降伏剪斷載重以及初始剛性等強度特性是以對接方式為最佳，搭接方式次之，CLT以結構用合板方栓進行接合之強度特性最低，由於結構用合板方栓有明顯壓潰破壞，建議未來可考慮進行改變方栓材質或提高方栓厚度之評估，以改善CLT接合之剪斷抵抗性能。在接合之用釘方式則是以30°~45°複斜固定之接合剪斷抵抗性能為最佳，45°斜釘及90°直釘固定接合者次之，其中搭接型式是以45°斜

釘固定者優於90°直釘固定，方栓接合型式則是以90°直釘固定較佳。以南方松集成元作為CLT外層時，可以提高對接型式接合之剪斷抵抗性能，對方栓接合及搭接則無差別。CLT以方栓接合時呈現高延展性，搭接型式對剪斷抵抗則主要呈現低延展性行為，CLT對接則主要呈現中度延展性行為。

### 致謝

本研究承科技部計畫(MOST 106-2313-B-020-005-MY3)經費補助，特此致謝。

### 引用文獻

- Bejtka I, Blaß HJ. 2002.** Joints with inclined screws. Kyoto, Japan: International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures. CIB-W18/35-7-4. 12 p.
- Brühl F, Kuhlmann U. 2012.** Connection ductility in timber structures considering the moment-rotation behavior. 2012 World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand. 10 p.
- Danzig I, Cloßen M, Tannert T. 2014.** High performance cross-laminated-timber shear connection with self-tapping screw assemblies. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada. 6 p.
- Gavric I, Fragiaco M, Ceccotti A. 2012.** Strength and deformation characteristics of typical X-LAM connections. 2012 World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand. 10 p.
- Gavric I, Fragiaco M, Ceccotti A. 2015.** Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures. Eur J Wood Prod 73:179-91.
- Hossain A, Danzig I, Tannert T. 2016a.** Cross-laminated timber shear connections with double-angled self-tapping screw assemblies. J

Struct Eng 142(11):04016099-1-9.

**Hossain A, Popovski M, Tannert T. 2016b.** Shear connections with self-tapping-screws for cross-laminated-timber panels. 2016 World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria. 8 p.

**JAS 3079. 2013.** Japanese agricultural standard for cross-laminated timber. Tokyo, Japan: Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries.

**Kitamori A, Nakashima S, Isoda H. 2014.** Development of CLT shear frame using metal plate insert connections. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada. 8 p.

**Ministry of the Interior. 2011.** Specification of wood-framed structure design and construction techniques. Taipei, Taiwan: Construct Mag 5:1-24.

**Mori T, Nakatani M, Chui YH, Gong M, Isoda H, Komatsu K. 2014.** Pull-out strength properties of lagscrewbolt connection cross laminated timber. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada. 9 p.

**NDS. 1997.** National design specification for wood construction. Washington, DC: American Forest & Paper Association, American Wood Council. p 75-101.

**Polastri A, Angeli A. 2014.** An innovative connection system for CLT structures: experimental-numerical analysis. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada. 8 p.

**Richardson BL, Hindman DP. 2016.** Lateral resistance of cross-laminated timber panel-to-panel connections. 2016 World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria. 8 p.

**Sadeghi M, Smith I. 2014.** Edge connections for CLT plates: in-plane shear tests on half-lapped and single-spline joints. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada. 9 p.

**Smith I, Asiz A, Snow M, Chui YH. 2006.** Possible Canadian/ISO approach deriving design values from test data. CIB-W18/39-17-1. p 10.

**Stecher G, Kögl J, Beikircher W. 2014.** Mechanical behavior of dovetail connections for cross-laminated timber wall elements. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada. 8 p.

**The Japan Housing and Wood Technology Center. 2001.** Allowable stress design for post and beam housing construction. Tokyo, Japan: The Japan Housing and Wood Technology Center. p 145-52.

**Yeh MC, Lin YL, Huang GP. 2016a.** Study of the shear performance of glulam joints using mechanical connectors and self-tapping screws. Taiwan J For Sci 31(2):119-33.

**Yeh MC, Lin YL, Huang GP. 2016b.** Moment-resisting performance of residential portal frames constructed with self-tapping screws. Taiwan J For Sci 31(4):305-21.

**Yeh MC, Lin YL, Sung YW. 2018a.** Evaluation of the performance of the vertical withdrawal resistance of structural self-tapping screws in wood. Taiwan J For Sci 33(2):109-23.

**Yeh MC, Lin YL, Sung YW. 2018b.** Evaluation of the performance of the double-shear resistance of glulam connections using structural self-tapping screws. Taiwan J For Sci 33(2):141-61.

