

研究報告

柳杉結構用集成材之螺栓接合抗拉強度

葉民權^{1,3)} 王栢村²⁾ 吳康正¹⁾

摘要

本研究以柳杉造林木開發作為結構用集成材，探討大尺寸木質構材之螺栓接合性能，柳杉集成材斷面為 20×100 mm，以RPF樹脂膠合成集成材，並利用強度試驗機進行實大尺寸抗拉試驗，分析構材接合特性以及各試驗條件對於接合強度之影響，其中試驗條件之螺栓標定直徑分別為15、18 mm；每支集成材單邊之螺栓接合使用數量為2、4、6支。結果顯示，就單支構件使用螺栓數目而言，柳杉集成材使用4及6支15 mm螺栓最大抗拉承載力分別為使用螺栓數目2支者1.58、2.68倍，而18 mm螺栓則為2.12、2.90倍，最大可達32603 kgf，同時發現使用螺栓支數對於接合性質之影響遠大於螺栓直徑之影響，15及18 mm螺栓之單支最大抗拉承載力分別為5389及5671 kgf，其平均最大承載強度分別為346及304 kgf cm²，降伏承載強度分別為233及241 kgf cm²。利用ANSYS有限元素分析模擬試材在最大載重之10%範圍下其應力以及螺栓孔周邊應變分布情形，結果顯示最大應力位置與實際破壞位置相符，其中除螺栓孔周邊有應力集中外，且因螺栓配置位置而有所不同，愈近端部其壓縮應力愈大，試材中央均呈抗拉應力。

關鍵詞：柳杉、集成材、螺栓、接合強度、有限元素分析。

葉民權、王栢村、吳康正。2007。柳杉結構用集成材之螺栓接合抗拉強度。台灣林業科學22(2): 101-111。

Research paper

Tensile Strength of Bolt Joints for Structural Glulam Members Made of Japanese Cedar

Min-Chyuan Yeh,^{1,3)} Bor-Tsuen Wang,²⁾ Kang-Cheng Wu¹⁾

【 Summary 】

Full-sized structural glued laminated timbers (glulams) were developed using Japanese cedar plantation wood to investigate the performance of bolt joints in this study. The glulams were

¹⁾ 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 University of Science and Technology, 1 Shuehfu Rd., Neipu, Pingtung 91201, Taiwan.

²⁾ 國立屏東科技大學機械工程系，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, 1 Shuehfu Rd., Neipu, Pingtung 91201, Taiwan.

³⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: yehmc@mail.npust.edu.tw

2006年8月送審 2006年9月通過 Received August 2006, Accepted September 2006.

assembled with laminae 20×100 mm in size using resorcinol-phenol formaldehyde (RPF) resin adhesives. Effects of bolt size, i.e., 15 and 18 mm in nominal diameter, and the number of bolts, i.e., 2, 4, and 6 bolts, on the joint strength and joint characteristics of glulam members were investigated through tensile tests. The results indicated that the maximum tensile capacities of glulam joints fastened with 4 and 6 bolts of 15-mm diameter were 1.58 and 2.68 times those of joints assembled with 2 bolts, respectively, while 2.12 and 2.90 times the maximum tensile capacities were found for joints assembled with 18-mm bolts, which reached a maximum of 32,603 kgf. The effect of the number of bolts on the joint performance of glulam members showed greater influence than did bolt size. The maximum tensile capacities per single bolt was 5389 and 5671 kgf for the 15- and 18-mm bolt connections, respectively. The maximum embedded strengths of glulam joints assembled with 15- and 18-mm bolts were 346 and 304 kgf cm⁻², and yielded embedded strengths of 233 and 241 kgf cm⁻², respectively. The stress and strain distributions around bolt holes showed correspondence between the ANSYS finite element simulation under 10% maximum loads and the actual failure locations of specimens. The stress changed among bolt locations in the glulam joints and also showed stress concentration around the bolt holes. Higher compressive stress occurred near the end of the stressed members, while the tensile stress was distributed in the middle of the glulam members.

Key words: Japanese cedar, glulam, bolt, joint strength, finite element analysis.

Yeh MC, Wang BT, Wu KC. 2007. Tensile strength of bolt joints for structural glulam members made of Japanese cedar. *Taiwan J For Sci* 22(2):101-11.

緒言

木材構件之接合方式繁多，一般除了榫接技術外，亦可利用木釘、鐵釘、木螺釘等進行結構體之組合。台灣地區近年來隨著木質構造建築的發展，建築物也有大型化設計之需求與趨勢，無論是木造橋樑、建築樓板系統、大型公共建築等，均可見及集成材製品之運用，由於集成材大多偏向於大型結構用途，在構件之間的連結往往需以金屬扣件進行接合，其中又以螺栓及類似扣件更是被廣泛的使用。

當木質構材透過螺栓、鋼棒等插銷型扣件進行接合時，一般由扣件之承載強度決定其在大型木結構構件的接合特性，有關於木質材料插銷型態接合強度研究中，Yeh and Hsieh (1994)在2×4規格柳杉材之螺栓抗拉試驗得知，在端距為5倍螺栓直徑的條件下，4及5分螺栓的抗拉承載強度較3分螺栓提高24及53%，最高可達2053 kgf，即使在絕對相等端距下亦分別較3分螺栓接合者提高21及28%。Lin (2004)在21年生台灣杉疏伐圓木以7倍螺栓端距接合

之抗拉試驗得知，在圓木直徑120及150 mm條件下，5分螺栓之抗拉承載能力相近，同時以雙支螺栓作為接合者，其承載力也大致成倍數提高，平均單支螺栓之接合效果為4015 kgf，若與前述柳杉比較，其明顯差異可能來自於接合構材之尺寸以及樹種比重因素。根據美國之木結構設計規範，有關螺栓接合之設計，亦考量使用超過2支以上螺栓時之折減(NFPA 1997)，因此有必要針對螺栓數量之影響進一步評估。

有關插銷扣件的接合性能方面，Sawata and Yasumura (2002)利用5%之偏距法及5 mm位移量之最大載重進行評估，在平行木理之插銷承載強度方面兩種方法之結果相近，且為木材平行木理抗壓強度的0.9倍，但是在垂直木理插銷承載強度方面，則前法之結果為木材垂直木理抗壓強度的4倍，後者則顯示插銷承載強度與木材垂直木理抗壓強度之比值，隨插銷直徑之增大而降低。Noguchi and Kohei (2003)利用一簡化方程式用以取代常用彈性基礎之梁理論

及歐洲地區所採用之降伏理論，進行螺栓之接合剛性估算，在假設無力矩存在及半滑動條件下，以剪斷力分別分析主構材與側構材，並發現理論估算之木材與螺栓接合降伏應力與試驗結果符合。上述之研究均以單支螺栓之接合進行抗壓分析，對於結構採用多數扣件之影響以及對木材接合破壞影響較明顯之抗拉試驗則值得進一步探討。

Kharouf et al. (1998)分析17.5 mm厚之雲杉及小樺松集成材以單支螺栓接合在平行木理載重下，其孔洞周邊之應力及應變情形，並以應變片作對照，量測集成材中不同邊距、端距及螺栓之間距應力集中處附近，並以有限元素分析預測應變情形，所得之平行、垂直木理抗拉應變數值和實測值相似。因此本研究進一步擬利用有限元素分析模擬，用以估算在多數扣件條件下之實大集成材應力分布。

國內人工林中，以中小徑木之速生樹種為主，其材質多未成熟，缺點較多且強度低，如要在資源利用上能有效的利用，並進一步應用於大型結構場合上，其構材在結構上之接合性能評估是必要的，本研究擬利用國產造林木開發製作集成材進行實大尺寸之接合試驗，探討以不同螺栓數及螺栓直徑對結構用集成材和金屬扣件接合強度之影響，透過木結構設計規範評估國產造林木在大型結構使用場合上的可行性，同時利用有限元素分析模擬實體模型之受力分布及預測破壞模式和實驗結果作一比較，期望未來能以有限元素分析方法更經濟及精準地預估關於木結構與金屬扣件接合性能。

材料與方法

一、試驗材料

(一)柳杉(*Cryptomeria japonica*)

產自嘉義阿里山地區30年生柳杉造林木，經製材、氣乾及刨光後製品尺寸為3600×100×20 mm作為集成元材料，含水率為13.9±0.61%，氣乾比重為0.56±0.05，平均年輪寬為2.9±0.1 mm。

(二)膠合劑

採用固形分為68.46%之間苯二酚-酚甲醛樹脂膠合劑(Resorcinol-phenol formaldehyde adhesive, RPF)，粉末狀聚甲醛作為硬化劑，室溫26℃下所測定黏度為455 cps，可使用時間約為40 min，常溫硬化時間約為5 h。

(三)金屬扣件

1. 電鍍鋅螺栓

螺栓為市售之電鍍鋅螺栓，直徑依接合試驗條件分別為15.88 mm (5/8 in)、19.05 mm (3/4 in)，長度分別為150、154 mm。

2. 中碳鍍鋅鋼板(S45C)

依集成材螺栓接合強度試驗方法自行設計接合抗拉扣件，經熱處理後之洛氏硬度為HRC 30±2，扣件寬度為160 mm，長度依不同螺栓數試驗條件可分320、460、600 mm三種，厚度為9±0.1 mm (Fig. 1)。

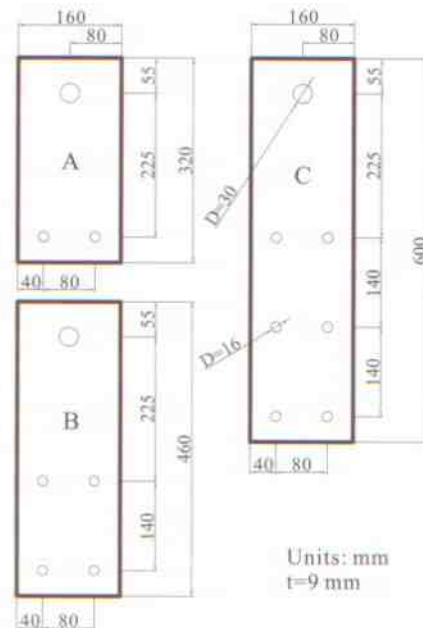


Fig. 1. Design of the mechanical fasteners for tensile testing of bolt joints. (A: 2 bolts, B: 4 bolts, C: 6 bolts, diameters: 15.88 and 19.05 mm).

二、試驗方法

(一)結構用柳杉集成材之製備

將柳杉試材依不同試驗條件之集成材尺寸及層積集成元支數，將集成元以RPF樹脂和硬化劑以100:15方式混合，採單面佈膠，佈膠量為 250 g m^{-2} ，利用扭力扳手(型號10002 MR，美國Consolidated Devices)以 10 kgf cm^{-2} 之壓力於6,000 mm長之工字樑夾具台集成，並施加適當側壓，加壓時間為6 h。集成斷面為 $100 \times 160 \text{ mm}$ ，解壓後依各試驗條件將集成材定長，分別為580、860、1,140 mm (Table 1)，將柳杉集成材固定於垂直鑽孔機進行鑽孔，使螺栓間距及端距均大於直徑7倍以上之距離(140 mm)，螺栓列距大於直徑4倍以上之距離，將鋼板扣件與柳杉集成材以螺栓作接合並以螺帽鎖緊螺栓，並將試樣安置於強度試驗機上進行接合抗拉試驗。

(二)集成材接合抗拉試驗

1. 試驗方法

依金屬扣件接合設計，以4片鋼板作為側構材，集成材為主構材，針對不同直徑螺栓及螺栓數量等試驗條件，於集成材試材上、下兩端作為對稱節點接合，再以50噸強度試驗機(萬匠公司)以抗拉方式施予載重(Fig. 2)，依據ASTM D5652-95 (ASTM 2002)規定試材於5~20 min內達到最大破壞載重，試驗中並於螺栓孔周邊黏貼應變片量測其應變量(Fig. 3)，試驗重覆次數為6次。

2. 最大螺栓承載強度

試驗過程紀錄最大破壞載重、抗拉變位量及集成材破壞情形，並計算螺栓之最大抗拉承載強度(embedded strength, f_e)，以探討接合方式、螺栓使用條件及抗拉承載強度之關係，計算式如下(Sawata and Yasumura 2003, Lin 2004)：

$$f_e = P / t d \dots \dots \dots (1)$$

其中 P 為載重(kgf)， t 為試材厚度(cm)， d 為螺栓直徑(cm)。



Fig. 2. Configuration of the bolt joint tensile test apparatus with steel plates for structural glulam members.

Table 1. Test conditions of bolt joints for structural glulam members made of Japanese cedar

Test condition	Bolt diameter (mm)	No. of bolts fastened on each side of member	Size of specimen (mm)
T2-15	15 (15.88) ¹⁾	2	580×160×100
T4-15		4	860×160×100
T6-15		6	1140×160×100
T2-18	18 (19.05) ¹⁾	2	580×160×100
T4-18		4	860×160×100
T6-18		6	1140×160×100

¹⁾ Values indicate the actual size of the bolt.

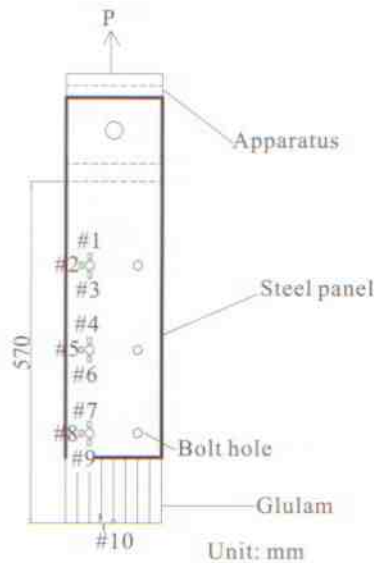


Fig. 3. Arrangement of the strain gages on the surface of glulam members for tensile testing.

3. 螺栓降伏承載強度

抗拉試驗以數據擷取系統取得各試體之最大抗拉力，計算出螺栓最大承載強度，再依據歐洲標準EN383 (ECS 1993)中針對插銷類金屬扣件以5%偏距法(5% off-set)計算降伏承載強度，根據每一試材載重-位移關係中，產生5 mm位移時所對應之載重值作為最大載重值($f_{e,5mm}$)，於曲線分別求出該最大載重值之10%及40%兩載重點($0.1 f_{e,5mm}$ 及 $0.4 f_{e,5mm}$)，並依此兩載重點形成一斜率直線，據此直線沿X座標平移5%螺栓直徑量畫一平行線，此線和載重-位移曲線之交點即為降伏承載力，最後再依此力計算出降伏承載強度($f_{e,5\%}$)。

(三)基本性質測定

依據CNS 453、454、455，分別進行柳杉抗壓強度、抗彎強度、抗剪強度試驗。

(四)有限元素分析模擬

本模擬試驗以ANSYS 5.7版依實際試驗承載之方式，模擬受拉情形下集成材接合時應力分布情形，結構體以平面力學考量，其中模擬試驗所使用之各類元素代表實際情形如Table 2，集成材平面元素之彈性模數為 $116,888 \text{ kgf cm}^{-2}$ ，螺栓平面元素則採用 $2.10 \times 10^6 \text{ kgf cm}^{-2}$ 。元素分割形狀為正方形，大小為 1 cm^2 ，接近螺栓孔周邊則採長度為5 mm作分割設定，由於結構接合之抗拉受力行為屬上下對稱，可將模型簡化成一半，故在各模型之下方設定對稱邊界，總元素分割數量為1,218個元素。為達到模擬試驗過程中抗拉載重方向為垂直向上(y軸正方向)之位移限制條件，故在鋼板扣件上方及各螺栓設定x方向位移為0 (Fig. 4)，所施加之載重採用實驗過程中，線性範圍之載重3250.8 kgf作為載重設定，約為最大破壞載重值之10%，分析目標為螺栓孔周邊應力應變分佈情形，並與實測結果以及試材破壞模式作一探討。

結果與討論

一、柳杉機械性質

依據CNS 453、454、455進行實木小試材強度試驗結果顯示，所得柳杉材縱向抗壓強度為 $482 \pm 21 \text{ kgf cm}^{-2}$ 、縱向抗剪強度為 $131 \pm 32 \text{ kgf cm}^{-2}$ 、抗彎強度為 $967 \pm 106 \text{ kgf cm}^{-2}$ 、抗彎彈性模數為 $93,606 \pm 8,721 \text{ kgf cm}^{-2}$ ，與Ma et al. (1992)所作柳杉之強度性質結果作比較，由

Table 2. Creative method of FE model simulation

Actual structure	Glulam member	Bolt	Steel plate
Finite elements	PLANE42: Simulating the physical wood member	PLANE42 with a CONTAC12 element aligned around the bolt holes to simulate force translation	BEAM3: Connection among all the bolts to simulate a steel plate holding up the bolts

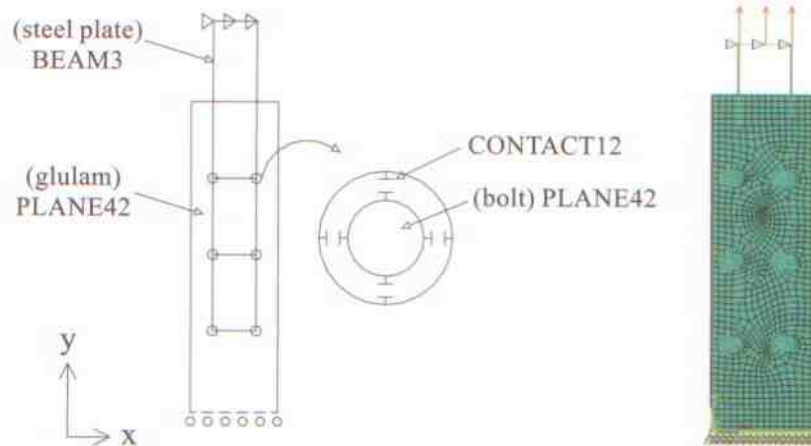


Fig. 4. Construction of the finite element model for a glulam member subjected to the axial tensile test.

於本試驗柳杉原木比重偏高且取材部位大多為心材附近，同時年輪寬較窄，在氣乾比重高達0.57條件下，其力學性質也有較高之傾向，尤其是縱向抗壓强度高出1.21倍，抗剪强度高出52%。

二、結構用柳杉集成材抗拉試驗破壞模式

柳杉集成材螺栓接合經抗拉試驗後之破壞情形如下：主要破壞是在兩列螺栓孔直徑投影範圍之木材產生沿平行木理之剪斷破壞面，劈裂直至試材端部(Fig. 5)，部分發生自螺栓孔至

試材端部之剪斷破壞時，於試材端部處推擠出一塊木材(Fig. 6)，此破壞模式與Lin (2004)對台灣杉疏伐圓木之研究有相似之結果，應為螺栓孔至端部距離所形成之木材抗剪抵抗面積不足所致。由於各試材所組成之集成元品質不一，在抗拉力作用下，如果在螺栓直徑投影範圍內，材質較差之集成元具有較低之強度性質，易先產生剪斷破壞，或在受力不均情形下導致集成材產生一條平行木理之剪斷破壞面，而Yeh and Hsieh (1994)指出木構件以螺栓接合在近構材端部時，所能承受之抗拉力之大小關鍵在於



Fig. 5. Shear failure occurring along each row of bolt holes parallel to the grain of a glulam member.



Fig. 6. Shear failure pushing a woodblock from the bolt holes to the end of a glulam member under tensile loads.

構件本身之抗剪性質，在本研究不同螺栓直徑條件下，以標定直徑18 mm螺栓接合之集成材在產生水平剪斷過程中，比標定直徑15 mm螺栓者更容易產生整支開裂情形(Fig. 7)，其中在單邊構件使用6支標定18 mm螺栓接合條件者，造成整支集成材開裂機率最高，而在螺栓破壞模式方面，由於標定15 mm螺栓直徑有較大之長徑比(螺栓在木材內之承載長度/螺栓直徑， L/D) 6.3，在抗拉條件下接合部位之降伏破壞模式多為NFPA (1997)中所定義之第IV型(扣件在每一剪斷面產生兩塑性鉸之彎曲降伏)，且當使用螺栓支數較少時，其接合部位每支螺栓受力較大，所產生之降伏破壞呈第IV型會愈明顯(Fig. 8)，而直徑18 mm螺栓本身因有較大剛



Fig. 7. Overall split along a glulam member connected with 18-mm bolts.



Fig. 8. Yield failure of bolts. (left: 15-mm bolts; right: 18-mm bolts).

性，對於靠近扣件區域受剪力之抵抗較大，不易產生彎曲降伏，故降伏模式多屬於第III型(扣件在每一剪斷面產生單一塑性鉸之彎曲降伏)。

三、螺栓接合之抗拉性質

柳杉集成材之接合抗拉試驗，係採用螺栓標定直徑15、18 mm兩種條件，分別在集成材構材兩端各以2、4、6支螺栓數之試驗條件，所得之抗拉力-變位之關係如Fig. 9，可知在相同螺栓端距下，隨著螺栓直徑增加，接合之抗拉抵抗力會提高，最高可達32,603 kgf，但並未隨螺栓數之增加而呈等比例之提高，此結果和Yeh and Hsieh (1994)實驗之實木以小尺寸螺栓接合之研究有相似的情形，就單邊構件使用螺栓數目而言，使用4及6支螺栓接合之柳杉集成材，其最大承載力在螺栓直徑15、18 mm分別為使用螺栓數目2支者的1.58、2.68倍及2.12、2.90倍(Table 3)。在降伏點之前之載重呈線性增加，過降伏點以上承載力增加趨勢開始變小，此趨勢與Sawata and Yasumura (2002), Lin (2004)有相似之結果，部份條件之曲線呈階梯狀，可能是由於各螺栓孔與螺栓密合程度不一，受到其些微之間隙在孔洞受力變形過程中所產生，結果顯示集成材之螺栓使用支數愈少，接合承載性能呈塑性變形趨勢愈明顯，這是由於螺栓使用數較少情形下，其接合剛性較低，個別之螺栓無法承受較大之抗拉力而導致在集成材未破壞前已造成扣件彎曲降伏，使變位急遽增大；在使用多支螺栓接合情形下，接

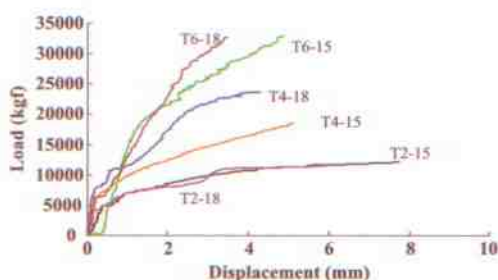


Fig. 9. Relationship between the load and displacement of bolted joints of Japanese cedar glulam in tensile testing.

Table 3. Tensile load capacity of bolt joints for Japanese cedar glulam

Test condition	Joint		Single bolt		
	Ultimate tensile load (kgf)	Yield tensile load (kgf)	Ultimate tensile load (kgf)	Ultimate embedded strength (kgf cm ⁻²)	Yield embedded strength (kgf cm ⁻²)
T2-15	12036 ± 2234 ^{d1)}	7459 ± 1372 ^d	6018 ± 1117 ^a	382 ± 70 ^a	254 ± 23 ^a
T4-15	19080 ± 1378 ^c	11180 ± 636 ^c	4770 ± 345 ^b	308 ± 22 ^{bc}	193 ± 14 ^b
T6-15	32269 ± 2876 ^a	22486 ± 1503 ^a	5378 ± 479 ^{ab}	347 ± 32 ^{ab}	251 ± 11 ^a
T2-18	11240 ± 1424 ^d	7878 ± 560 ^d	5620 ± 712 ^a	301 ± 40 ^{bc}	240 ± 10 ^a
T4-18	23833 ± 2230 ^b	17012 ± 1209 ^b	5958 ± 558 ^a	321 ± 30 ^{bc}	219 ± 37 ^{ab}
T6-18	32603 ± 2826 ^a	31417 ± 2718 ^a	5434 ± 471 ^{ab}	290 ± 25 ^c	263 ± 32 ^a

¹⁾ Duncan's grouping $\alpha = 0.05$, $a > b > c$.

合處整體剛性提高，在螺栓未達到完全彎曲降伏前，木質材料本身即產生破壞，使載重-變位曲線顯示較高之彈性行為，但一般而言，使用較大直徑螺栓時，接合位置量測出之抗拉變位量皆小於螺栓直徑較小者。

經由抗拉試驗後計算出每支螺栓平均最大抗拉承載力及承載強度，因使用支數及直徑有所差別但並不一致，其中2支15 mm螺栓條件者在所有接合條件中為最高，但其變異性在所有試驗條件中也為最大，4支者之承載力最低(Fig. 10)，以18 mm螺栓接合者，各條件差異不大，平均每支螺栓抗拉承載力可達5671 kgf；以15 mm螺栓接合者，平均每支承載力為5389 kgf，但以4或6支接合之條件皆有偏低之現象。整體來說，直徑18 mm螺栓之抗拉承載力雖仍略高於直徑15 mm者，但因受限於集成材本身之抗

剪特性而無明顯之提昇效果。本試驗之螺栓間距是依據規範中所規定抗拉受力之最低要求進行測試，如果加大間距及端距是否能有效改善木材剪斷抵抗，進而提昇18 mm螺栓之接合強度，則有待進一步探討。

經由5%偏距法評估之螺栓降伏承載強度與最大承載強度比較時，在15 mm直徑螺栓條件下，以不同螺栓數接合者，前者約為後者之58-68%，而18 mm直徑螺栓接合者則介於70-96%，此結果和Sawata and Yasumura (2003)及Lin (2004)之研究也有相似之趨勢，在最大降伏承載強度方面，18 mm螺栓在單邊構件使用螺栓數6、4、2支分別比15 mm螺栓者低約16.5、-4.2及21.2%，故螺栓直徑對螺栓抗拉承載強度之影響較使用螺栓數之影響為小，直徑18 mm之螺栓由於剛性較15 mm者高，故其在抗拉受力情形下，所得到之載重-變位關係具有較大之線性範圍，同時因試材之螺栓孔較大，有可能因淨斷面積減少降低材料本身之承載能力，在達到螺栓降伏強度後，試材很快在接合處因應力集中而破壞。

依本結構設計規範可計算出15 mm螺栓在本研究之接合條件下單支螺栓降伏力為2934.6 kgf，約為本試驗2支螺栓接合降伏引張力之78.7%，大致與4支接合者相近，又為6支螺栓接合者之78.3%。在18 mm螺栓方面，規範容許之單支降伏力為4000.5 kgf，約與本試驗2及4支螺栓接合降伏抗拉力相近，但為6支接合者之76.4%，相較之下，現行規範所訂定之降伏力較

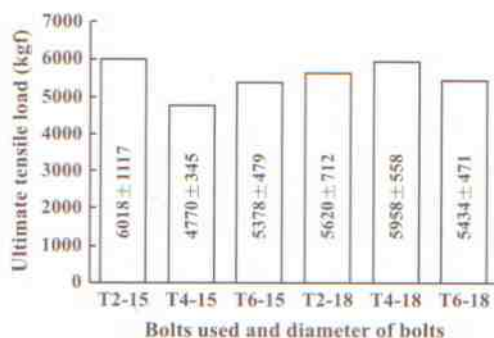


Fig. 10. Ultimate tensile load of single bolts for Japanese cedar glulam joints.

EN383之5%偏距法所求得之值略為保守。依規範計算15及18 mm螺釘之單支長期容許剪力分別為978.2及1333.5 kgf，換算成本試驗不同螺釘數接合條件，平均分別僅為試驗最大抗拉載重值之18.3及23.5%。

木構材之螺釘接合，其承載應力與長徑比有密切關係，USDA木材手冊指出長徑比值小者在降伏載重下之承載應力較大(USDA 1987)。如依其所述之推導程序，以平行木理抗壓強度之5%除外水準值(exclusion value)，透過正常載重及安全係數調整值1.9，所得之螺釘基本平行木理承載應力(bolt-bearing stress)，再作螺釘承載長徑比之調整，本研究15及18 mm之長徑比分別為6.30及5.25，因此可得151.4及180.8 kgf cm^{-2} ，此二值分別為本試驗單支螺釘降伏承載強度平均值之65.1及75.1%，調整後之平行木理承載應力，最後計算螺釘埋入木構材之投影面積，可得15及18 mm螺釘在集成材之容許螺釘載重2404及3444 kgf，與試驗結果相較亦顯著為低，同時又高於前述國內設計規範之容許降伏力，同樣說明國內所採用之螺釘接合設計值較北美所採用者為保守。

四、集成材抗拉之有限元素分析

經由ANSYS分析出在抗拉力3250.8 kgf載重下，亦即最大載重之10%條件，其y方向應力(σ_y)及抗剪應力分布(τ_{xy})之分佈如Figs. 11與12，結果顯示，在螺釘孔處皆有應力集中現象產生，尤其在靠近試材中央部位之螺釘孔(圖中下端)所產生之抗拉應力較大，此現象和柳杉集成材所發生之實際破壞位置相符，就Fig. 13實際集成材破壞模式而言，在靠近試材長度中央部位之螺釘孔，其間產生似Y型裂隙與應力分布趨勢相近，可知此分析和柳杉集成材之破壞模式相當吻合。再以剪應力(τ_{xy})分佈而言，集成材主要受螺釘抗拉力作用而使所有螺釘孔皆有剪應力存在，破壞時會產生平行木理之抗剪破壞，與實際破壞模式大致相符，故應用有限元素分析所分析出試材應力分布情形後，可有效預測出試材之發生破壞位置。

此外，依ANSYS所分析柳杉集成材螺釘

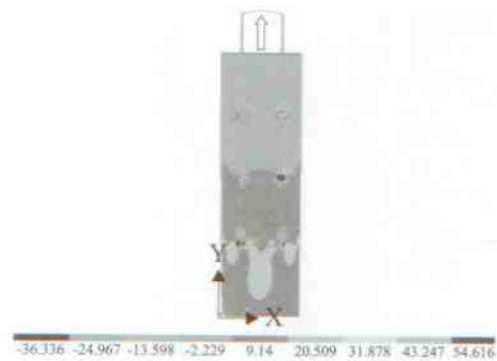


Fig. 11. Simulated normal stress distribution along the y-axis (σ_y) of a glulam member subjected to 10% of the maximum tensile load at failure (3250.8 kgf).



Fig. 12. Simulated shear stress (τ_{xy}) distribution of a glulam member subjected to 10% of the maximum tensile load at failure (3250.8 kgf).

孔周邊之應變與實測值之比較如Fig. 14，當具有孔洞之材料在受軸向抗拉時，孔緣切線方向亦即平行受力方向會呈最大抗拉應力之集中現象，故本試驗中2、5、8號應變片皆產生抗拉應變，由於螺釘在抗拉力作用下產生螺釘彎曲降伏，對螺釘孔上緣形成之支點造成壓迫，使1、4號應變片產生抗壓應變，就彈性理論而言，孔洞周邊之應力集中處所產生抗拉應變應為非應力集中處平均抗拉應變之3倍，但由Fig. 14可知



Fig. 13. Resultant Y-shaped split of a glulam member at failure during the tensile test.

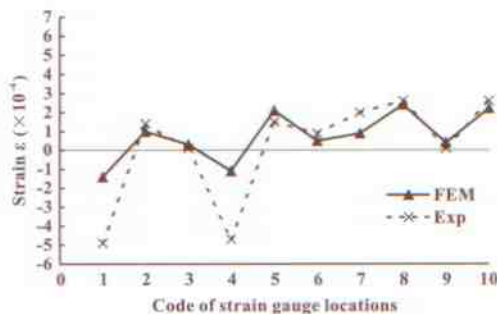


Fig. 14. Comparison of the strain in the y-axis between estimated data of FE models and actual measurements.

2、5、8號應變片之抗拉應變量未達到10號應變片之3倍，此外，在應變數值中，1、4號應變片分析值和實測值差異較大，可能原因為在受拉過程中，螺栓所產生之抗彎降伏以及孔洞邊緣木材所產生非線性應變形成洞孔周邊受力不均所致。

再以應力分析來看，藉由所測定柳杉材抗拉彈性模數 $116,888 \text{ kgf cm}^{-2}$ 、抗壓彈性模數 $100,146 \text{ kgf cm}^{-2}$ ，再依量測出應變值所計算出應力值與Fig. 14有相同趨勢，在1、4號應變片具有較大之抗壓應力的產生，其餘皆為抗拉應力，根據應變片之數值以及有限元素分析結果，得知沿軸向不同位置之螺栓孔周圍木材承受不同程度之應力，尤其是離材端最遠之內側螺栓有不同之受力，在前述章節所分析之螺栓承載強度均是假設接合處每支螺栓是平均受力條件，因此可預期部分螺栓如離木材端部最近者將承載更大之外力並成為破壞發生的主要位置。藉由材料力學之理論計算，在集成材中央無螺栓部位受 3250.8 kgf 作用下，除以試材斷面積，其平均應力約為 20.7 kgf cm^{-2} ，由ANSYS分析出10號應變片應力值為 20.6 kgf cm^{-2} ，此與材料力學之理論值是相近的，但實驗對照組10號應變片之應力實測值較大，可能原因與上述量測彈性模數之材料與試材中各集成元之品質差異，較高之彈性模數使分析出之數值造成偏差。

結論

本研究採用國產柳杉造林木開發結構用集成材，評估以實大材利用螺栓金屬扣件接合之性能，作為木結構施工之依據設計，結果顯示，在相同螺栓端距下，隨著螺栓使用支數增加，接合之抗拉承載力隨之明顯提高，但並不一定呈倍數比例改善接合效果，就螺栓直徑而言，15及18 mm螺栓之承載能力相近，但後者之接合剛性較佳。由5%偏距法評估出之螺栓降伏承載強度和螺栓最大承載強度作比較，18 mm螺栓介於70~96%，而15 mm螺栓介於58~68%，由平行木理抗壓強度所推導之15及18 mm螺栓承載應力亦約分別為降伏承載強度之65.1及75.1%，具有相當之安全性，而依據設計規範所得之15及18 mm螺栓長期容許剪力亦分別為本研究之最大抗拉載重之18.3及23.5%，因此柳杉造林木製造結構用集成材具有良好之螺栓接合效果。以有限元素分析軟體分析集成

材之螺栓接合，能預估集成材受力所產生之位置，所分析出應力應變值與實測值亦相當穩合，經試驗及分析均證實接合處之螺栓，因配置不同會承載不同之外力，此與結構設計時之平均承載力運用有所不同，未來可進一步針對多數螺栓接合進行探討。

謝誌

本研究承國科會專題研究計劃(NSC 94-2313-B-020-001)補助，謹此謝誌。

引用文獻

ASTM. 2002. Standard test methods for bolted connections in wood and wood-based products. ASTM D5652-95. Philadelphia, PA: American Society for Testing and materials.

ECS. 1993. EN383: Timber structures-test methods--determination of embedding strength and fundation values for dowel type fasteners. London, England: European Committee for Standardization.

Kharouf N, McClure G, Smith I. 1998. Stress analysis of one- and two-bolt timber connections. Proceedings 5th World Conference on Timber Engineering. Monteux, Switzerland. Vol. 1. p 329-36.

Lin YL. 2004. Application of domestic thinnings on the trussed bridge. [MSc thesis]. Pingtung, Taiwan: National Pingtung Univ. of Science and Technology. 79 p. [in Chinese

with English summary].

Ma ZB, Chen TJ, Syong RT, Hung CI, Chen SS, Jhai SU. 1992. Properties of Important Commerical Wood. Forest Publication no. 1. Taipei, Taiwan: Taiwan Forestry Research Institute. p 4. [in Chinese].

National Forest Products Association. 1997. National design specification for wood construction. Washington, DC: American Forest & Paper Association and American Wood Council. ANSI/AF & PA NDS-1997, p 119. [in Chinese].

Noguchi M, Kohei K. 2003. New proposal for a method to estimate stiffness and strength of bolted timber-to-timber joints and its verification by experiments. Mokuzai Gakkaishi 49:92-103.

Sawata K, Yasumura M. 2002. Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners. J Wood Sci 48:138-46.

Sawata K, Yasumura M. 2003. Estimation of yield and ultimate strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory. J Wood Sci 49:383-91.

USDA. 1987. Wood Handbook: wood as an engineering material. Washington, DC: USDA Forest Service, Agriculture Handbook 72. p 7-17.

Yeh MC, Hsieh CH. 1994. Evaluation of holding ability of bolts and lag screws with *Cryptomeria* lumber. Taiwan For Prod Ind 13(2):263-74. [in Chinese with English summary].