

研究報告

木質構造建築構件火災災後調查與抗彎性質評估 —以溪頭青年活動中心為例

林志憲¹ 李佳如² 楊德新³

【摘要】本研究以救國團溪頭青年活動中心之木結構建築為例，探討火災被害材之強度性質，以及利用非破壞檢測技術評估受害材之抗彎性質之可行性。結果指出，火災被害材經鑑定結果發現，該木質結構體之樑體為柳桉木 (Lauan, *Shorea* spp.) 與冰片木 (Kapur, *Dryobalanops* spp.)，而柱體則為柳杉 (Japanese cedar, *Cryptomeria japonica*)。經強度試驗及與文獻資料比較後指出，柳桉木火災被害材之抗彎強度保留率與抗彎彈性模數保留率各為65.4%與91.5%；冰片木火災被害材之抗彎強度保留率為50.5%，而抗彎彈性模數保留率為67.6%；柳杉火災被害材之抗彎強度保留率約為59.9%，抗彎彈性模數保留率則約為44.6%，至於抗壓強度則較無顯著影響。另利用超音波法與打音法兩種非破壞檢測技術評估火災被害材之抗彎性質指出，以超音波動彈性模數與打音動彈性模數評估抗彎彈性模數與抗彎強度，其 R^2 值分別為0.95與0.71-0.72，顯示良好之正相關性，因此可利用此法評估火災被害材之強度性質，以作為將來評估其再利用之可行性參考。

【關鍵詞】火災被害、非破壞性評估、抗彎強度

Research paper

Investigation on the Wooden Structure Member and Bending Properties Evaluation after Fire Damaged-A case study for Xitou youth activity center

Chih-Hsien Lin¹ Chia-Ju Lee² Te-Hsin Yang³

【Abstract】This study was to investigate the strength properties of the fire-damaged wooden structural members and evaluate those bending properties using nondestructive testing. The fire-damaged wooden construction materials were selected from Xitou youth activity center, Nantou County, Taiwan. Three species, Lauan (*Shorea* spp.), Kapur (*Dryobalanops* spp.) and Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)

1. 國立中興大學森林學系 研究生

Graduate student, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

2. 國立台灣大學實驗林管理處 研究助理

Research Assistant, The Experimental Forest, National Taiwan University.

3. 國立中興大學森林學系 助理教授 (通訊作者)，402台中市南區國光路250號

Assistant Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding author. 250, Kuo Kuang Road, Taichung 402, Taiwan. E-mail : tehsinyang@dragon.nchu.edu.tw

could be identified from beam and column structure, respectively. Results indicated that modulus of rupture (MOR) retention for fire-damaged Lauan, Kapur and Japanese cedar lumber were 65.4%, 50.5% and 59.9%. Additionally, the modulus of elasticity (MOE) retention for those were 91.5%, 67.6% and 44.6%, respectively, and it seemed that there was no significant effect on compression strength between normal wood and fire-damaged wood. Furthermore, it was found that there were well correlations between static bending properties and dynamic modulus of elasticity (DMOEu and DMOEt, which were calculated from ultrasonic wave and tap tone method, respectively). R^2 value was 0.95 and 0.71-0.72 for MOE to DMOEu and DMOEt, and MOR to DMOEu and DMOEt, respectively. Therefore, these types of nondestructive techniques could be used to evaluate the bending properties of fire-damaged wood.

【Key words】 Fire damaged, Nondestructive evaluation, Bending strength

一、前言

2009年12月14日凌晨一場大火，造成位於溪頭森林遊樂中心內，具有超過30年歷史之救國團溪頭青年活動中心行政辦公室、餐廳與供應部因火害損毀，據消防局研判本次大火應與電線走火有關，火勢約持續2h。火害次日，許多新聞報導旋即指出由於木造住宅易燃，因此受害嚴重。事實上，建築物之火災性狀會依構造之不同，或是依建築內裝種類或開口部之形狀、尺寸等條件之不同而異。火災的行進歷程可分為閃燃 (Flash-over) 前之火災初期，即出火後不久，燃燒現象僅限於火源附近之可燃物；而閃燃後之火盛期，建築物會以定長速率燃燒之持續一段時間；最後則是當可燃物燃燒完了後之下降期。而在閃燃前後溫度急速上升之時期稱為火災成長期，此時期會因前述可燃物之多寡而異，可燃性材料之表面加熱著火時，在該處會發生火點，火災則會沿著材料表面，例如牆壁會向著垂直方向或水平方向，另外天花板或地板會向水平方向擴張稱為火焰傳播。其傳播速度愈小之材料即表示其愈難燃燒，亦即其火災擴大之危險度較小，對於木材而言通常有比重愈大、尺寸愈大之木材，其火焰傳播速度愈小之趨勢。在討論木質結構材料之耐燃性質中，常以炭化速度來表示木材之燃燒特性，此係木材在表面著火、燃燒時，其受火害部位由外而內會形成如圖1所示炭化層 (Char layer)、炭化底層 (Char layer base)、

熱裂解區域 (Pyrolysis zone)、熱裂解區域底層 (Pyrolysis zone base) 與正常材 (Normal wood) 等五區 (Smulski, 1997)，而炭化從木材表面向內部進行之速度，即為炭化速度。在以往的研究中顯示炭化速度會受樹種、密度、含水率與熱特性等影響，而在種種影響炭化速度之因子中，又以木材之密度被認為是影響炭化速度之主要因子 (Schaffer, 1967; Fredlund, 1988; White, 1988; Collier, 1992; Konig and Walleij, 1999)。Yang *et al.* (2009a) 以台灣杉、杉木、柳杉、花

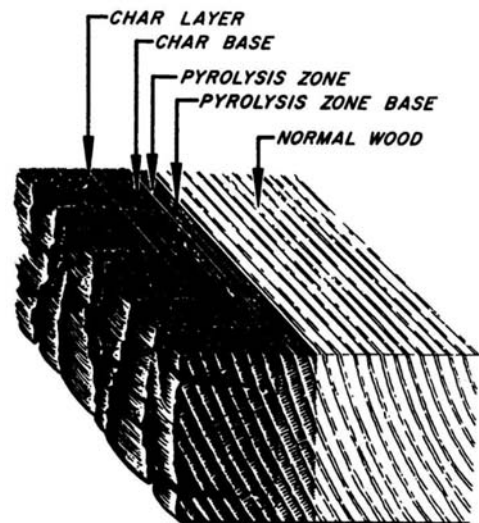


圖1. 炭化材各部名稱

Fig. 1. Illustration of charring of wood slab (Smulski, 1997)

旗松與南方松之標準燃燒試驗結果亦指出，隨密度之增加，其燃燒速度有降低之趨勢，而燃燒速度亦與試材本身之發熱量有關。此外，AITC (2004) 的研究指出，相較於鋼鐵材料於燃燒30 min後，強度衰減90%，木材經30 min之燃燒結果，其強度僅約減少25%，Yang *et al.* (2009b) 亦指出經30 min標準燃燒試驗後，國產柳杉、杉木與台灣杉尚保有70.9-75.9%之強度保留率。此亦為在許多燃燒現場可見木構建築能維持原結構不致倒塌之原因，圖2為救國團溪頭青年活動中心火災現場木結構受害狀態，可以發現作為樑柱之木構材料雖受火害，但尚能維持其結構狀態。

本研究即選用救國團溪頭青年活動中心火

災現場所留存之木構樑柱材料，進行樹種之鑑定、以及材料物性與抗彎性質之檢測，同時利用非破壞性檢測儀器進行材料之性質評估，最後分析火災被害木構材料之基本性質，評估其材料再利用之可行性。

二、試驗材料與方法

(一) 試驗材料

本試驗材料取自救國團溪頭青年活動中心火災後之現場，由現場取得木樑46支 (行政辦公室9支、餐廳部22支、供應部15支) 與木柱8支 (餐廳部)，共計54支。所有試材經去除炭化層後，在保持最大斷面尺寸之原則下，將斷面裁切分成三等分並製成長度2 m之試材，以利



圖2. 救國團溪頭青年活動中心火災現場

Fig. 2. Fire scene of Xitou youth activity center

後續試驗用。

(二) 試驗方法

1. 材種鑑定

依木材橫斷面組織之主要特徵與觸感、氣味等次要特徵進行，並與相關圖鑑、樣本進行比對，以完成材種鑑定。

2. 超音波法

使用超音波儀 (Sylvatest Trio, 22KHz) 測定其縱向超音波速，其利用一發聲器 (Pulse generator) 及一接受器 (Receiver) 直接貼附於試片兩端，測定音波傳遞所需之時間，再依次式計算出其速度

$$V_u = \frac{L}{t} \quad (1)$$

V_u 為縱向超音波速 (m/s)， L 為試片長 (m)， t 為時間 (sec)。

而一般固體材料之音速 (V_u) 與其彈性模數 (DMOE_u)，密度 (ρ) 之間有次式之關係：

$$DMOE_u = V_u^2 \times \rho \quad (2)$$

3. 打音法

使用打音測定儀 (Multi-purpose FFT Analyzer CF-5220, ONO SOKKI)，以鋪有泡棉之木塊支持試片中央位置，以硬質橡膠槌敲擊試材之一端，打音由置於試材另一端之麥克風檢出，並利用快速傅利葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT) 頻譜分析儀，將瞬間發生之打音波形分解成頻譜，便可精密測量出其自然振動頻率，並由次式可計算出其音速 (V_t) 與動彈性模數 (DMOE_t)：

$$V_t = 2fr \times L \quad (3)$$

$$DMOE_t = 4fr^2 \times L^2 \times \rho \quad (4)$$

V_t 為縱向音速 (m/s)， L 為試片長 (m)， fr 為自然頻率 (Hz)， ρ 為木材密度 (kg/m^3)

4. 抗彎試驗

將火災被害試片 (實大材) 進行三分等載重抗彎破壞試驗，計算其抗彎強度 (Modulus of

rupture, MOR)，並在比例限度內求其抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE)

$$MOR = \frac{P_{\max} l}{bh^2} \quad (5)$$

$$MOE = \frac{\Delta P(l-s)[2l^2 + 2ls - s^2]}{8\Delta\delta bh^3} \quad (6)$$

P_{\max} 為最大載重， ΔP 為比例限度領域上限載重與下限載重之差 (N)， $\Delta\delta$ 為與 ΔP 相對應跨距中央之撓度差 (mm)， l 為跨距 (mm)， s 為兩載重點距離 (mm)， b 為試片寬度 (mm)， h 為試片厚度 (mm)。

5. 縱向抗壓試驗

選取經抗彎試驗後完整部位之試材，製成30塊尺寸為 $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ 之抗壓試材，依 CNS 453 號木材抗壓試驗法標準進行被害材之縱向抗壓試驗，並依下式計算抗壓強度 (Compression strength, CS)

$$CS = \frac{P_{\max}}{A} \quad (7)$$

P_{\max} 為最大載重 (N)， A 為斷面積 (mm^2)

6. 密度與含水率

密度與含水率試驗分別依 CNS 451 與 CNS 452 標準進行，將前述經抗彎破壞試材分別自距離兩端部 10 cm 處與中央處各裁取一片試片進行試片之長、寬、厚與氣乾質量 (W_1) 之量測，計算試片之氣乾密度後平均之；另將測定完氣乾密度之試片放置於 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱中進行乾燥至恆量後，量測其乾燥後質量 (W_0)，並依下式計算其試材含水率 (Moisture content, MC)

$$MC = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (8)$$

三、結果與討論

(一) 材種鑑定結果

火災被害試材經斷面鋸切後，以10倍放

大鏡觀察並與相關圖鑑對照後，本試驗所選取之火災被害材，除餐廳部之木樑外，均為龍腦香科 (Dipterocarpaceae) 之柳桉木 (Lauan, *Shorea* spp.)，如圖3所示，其放大鏡鑑定特徵為為散孔材，管孔單獨或2-3個徑向排列，具填充體，於橫斷面垂直樹脂溝呈明顯之白色同心圓狀排列；而餐廳部上方之木樑則為冰片木 (Kapur, *Dryobalanops* spp.)，如圖4所示，其放大鏡鑑定特徵為為散孔材，管孔單獨或兩個徑

向或斜向並列，具填充體，於橫斷面具垂直樹脂溝成同心圓狀排列等。另8支柱體之部分，為杉科 (Taxodiaceae)之柳杉 (Japanese cedar, *Cryptomeria japonica*)，如圖5所示，其放大鏡鑑定特徵為春秋材移行劇烈而明顯，木理通直，略具芳香，不具樹脂溝等。可以發現，早期於溪頭青年活動中心所使用之木結構材料，除國產之柳杉外，尚有東南亞進口之龍腦香科木材，在本處用材亦較柳杉為多。

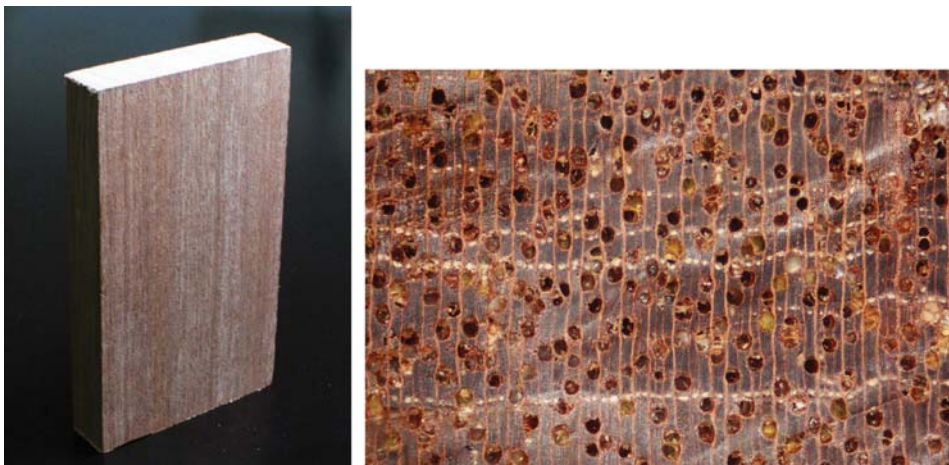


圖3. 火災被害材柳桉木之外觀與顯微特徵

Fig. 3. Feature and cross-section anatomy characteristics of fire-damaged Lauan wood

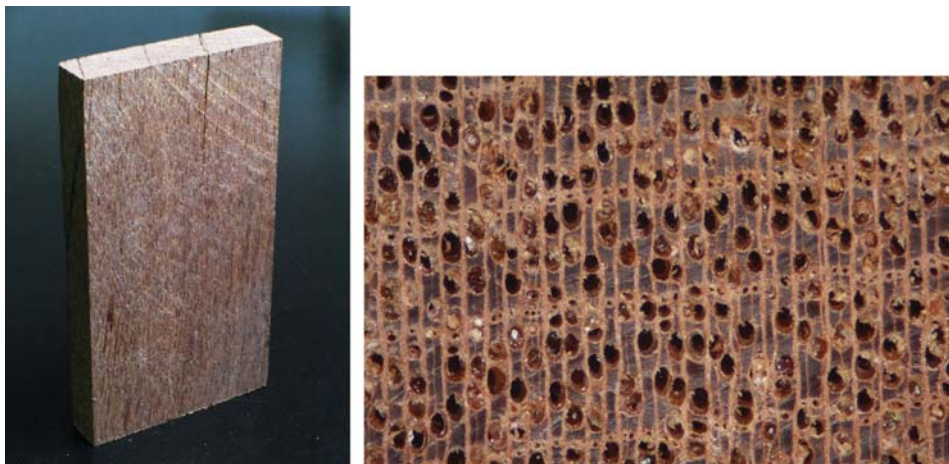


圖4. 火災被害材冰片木之外觀與顯微特徵

Fig. 4. Feature and cross-section anatomy characteristics of fire-damaged Kapur wood

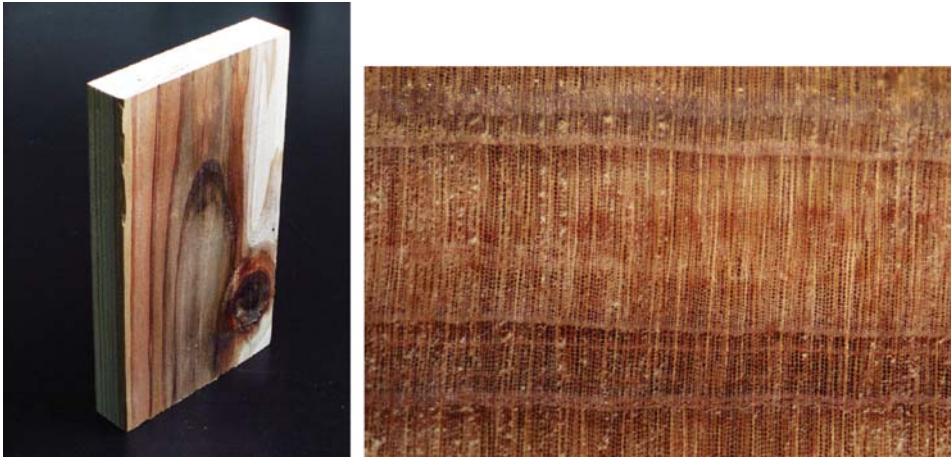


圖5. 火災被害材柳杉之外觀與顯微特徵

Fig. 5. Feature and cross-section anatomy characteristics of fire-damaged Japanese cedar wood

(二) 火災被害材之抗彎性質

表1所示為火災被害材之基本性質，就抗彎性質而言，柳桉木火災被害材抗彎強度平均值為59.9 MPa，抗彎彈性模數為10.8 GPa，其中抗彎強度之變異較其他樹種為大，推測此係由於本樹種木樑支數較多與各個受火害之溫度與時間長短不同所致，另木材受火害時之質量損失亦反映在密度值之變異，其密度分佈範圍由421.8 kg/m³至716.6 kg/m³，兩者差異將近70%。王松永 (2002) 商用木材一書中指出柳桉木之抗彎強度與抗彎彈性模數分別為91.6 MPa與11.8 GPa，本試驗之柳桉木火災被害材約較之減少34.6%與8.5%，抗彎強度保留率與抗彎彈性模數保留率各為65.4%與91.5%。冰片木木樑之火災被害材方面，其抗彎強度與抗彎彈性模數分別為52.4MPa與9.6GPa，相較於王松永 (2002) 於商用木材一書中指出冰片木之抗彎強度為80.8-126.8 MPa，平均為103.8 MPa、抗彎彈性模數為11.2-17.2 GPa，平均為14.2 GPa，可以發現，冰片木火災被害材抗彎強度方面約較文獻值減少約49.5%，其抗彎強度保留率約為50.5%，而抗彎彈性模數則約減少32.4%，抗彎彈性模數保留率較抗彎強度保留率為高，其值約為67.6%，可以發現，作為木樑之柳桉木

與冰片木其抗彎彈性模數因火害減低之程度較不如抗彎強度顯著。

此外，作為柱用之柳杉火災被害材抗彎強度平均值為32.8 MPa，抗彎彈性模數則為4.5 GPa，卓志隆 (1998) 曾針對國立台灣大學實驗林管理處溪頭林區第三林班173號造林地，樹齡40年之柳杉造林木進行柳杉靜力機械性質之強度變異性探討，研究指出柳杉之抗彎強度為45.5-64.1 MPa，抗彎彈性模數則為8.8-11.3 GPa，若以平均強度視之，則火災被害材之抗彎強度保留率約為59.9%，抗彎彈性模數保留率則約為44.6%，其抗彎彈性模數保留率較柳桉木與冰片木火災被害材為低，此應與密度及結構柱體為四面受熱，其受火災危害程度較為嚴重有關。

國內早期研究中，陳載永與陳合進 (1997) 曾以北港朝天宮聖父母殿火災後現場取樣之杉木、紅檜、樟木與台灣杉四種材料，進行火災後木質結構用材之抗彎試驗，亦有相似結果，研究指出經火災後，各樹種之抗彎強度約減少47-65%、而抗彎彈性模數則約減少25-46%。AITC (2004) 的研究指出木材在經30 min 燃燒後其強度的保留率 (75%) 遠高於鋼鐵材料 (10%)，此係木材燃燒雖是一連串複雜之反

應，但其會形成炭化層而阻隔了外界氧氣與火焰，減緩其木材斷面之減少，而此炭化行為即為木結構防火設計中相當重要之一環，一般而言，木材的炭化行為可由質量損失率與炭化層形成速率來表示，其中以後者較為廣泛使用，特別是在火害下的木結構安全設計與分析中。Njankouo *et al.* (2004) 以不同密度之熱帶木材進行燃燒試驗指出，木材在標準燃燒試驗下，初始的炭化速度相當快速，特別是在100°C之後，因為水分的散失，木材之燃燒速度將增加，而在300°C時，則有一不明顯的下降點，此點常被視為炭化層的產生點，同樣的結果亦

可見於在早期有關於結構材燃燒特性之研究中 (Lau *et al.*, 1999)。歐洲法規 (Eurocode 5-1.2) 中建議密度高於450 kg/m³之樹種，其炭化速度以0.5 mm/min計，本次於溪頭青年活動中心所取得之火災被害材，以火災持續時間為2 h計算，其炭化層應達60 mm，唯在非標準試驗下，且現場拆卸過程中所造成的炭化層剝落以及無原始建築資料之情況下，並無法有效的確認其炭化深度，但可以確認的是，經火災危害後之木材，其強度保留率尚屬優良，在考量資源能有效利用之下，此類之材料經炭化層清理後仍可作為後續其他用途使用。

表1. 火災被害材之基本性質

Table 1. Fundamental properties of fire-damaged lumber

Lumber size	Item	Min	Max	Mean
Lauan	Sample numbers	31		
	density (kg/m ³)	421.8	716.6	604.6 (90.3)
	MC (%)	11.1	16.3	14.1 (1.0)
	Vu (m/s)	4646	5779	5117 (265)
	Vf (m/s)	4563	5627	5050 (265)
	DMOEU (GPa)	10.6	20.2	15.8 (2.6)
	DMOEt (GPa)	10.5	19.7	15.4 (2.5)
	MOE(GPa)	8.1	14.4	10.8 (1.8)
	MOR (MPa)	31.0	87.3	59.9 (14.9)
	CS (MPa)	43.6	52.8	48.4 (8.9)
Kapur	Sample numbers	16		
	density (g/cm ³)	424.9	645.6	553.6 (66.3)
	MC (%)	12.0	16.3	13.8 (0.8)
	Vu (m/s)	4502	5099	4869 (162)
	Vf (m/s)	4387	5003	4779 (158)
	DMOEU (GPa)	9.4	16.8	13.2 (2.3)
	DMOEt (GPa)	9.0	16.2	12.7 (2.1)
	MOE(GPa)	7.1	12.1	9.6 (1.5)
	MOR (MPa)	35.4	65.9	52.4 (9.1)
	CS (MPa)	40.0	54.6	49.9 (3.5)

	Sample numbers	8			
	density (g/cm ³)	374.5	456.6	403.7	(25.7)
MC (%)	13.9	15.6	15.0	(0.5)	
Vu (m/s)	3259	4528	3880	(483)	
Vf (m/s)	3164	4681	3815	(511)	
Japanese cedar	DMOEu (GPa)	4.3	8.1	6.2	(1.5)
	DMOEt (GPa)	4.0	8.6	6.0	(1.6)
	MOE(GPa)	2.4	6.0	4.5	(1.3)
	MOR (MPa)	23.7	41.0	32.8	(5.6)
	CS (MPa)	27.5	44.3	39.1	(4.9)

Vu: ultrasonic velocity, Vt: tap tone velocity, DMOEu: dynamic modulus using ultrasonic wave method, DMOEt: dynamic modulus using tap tone method, MOE: static modulus, MOR: modulus of rupture, CS: compression strength, values in parentheses represent the standard deviation.

(三) 火災被害材之抗壓性質

三組火災被害材之抗壓性質如表1所示，柳桉木與冰片木火災被害材之抗壓強度分別為48.4 MPa與49.9 MPa，兩組試材經變異數分析與同質性檢定結果並無顯著差異存在，王松永(2002)指出柳桉木之抗壓強度為52.8 MPa，而冰片木之抗壓強度約在44.6-62.7 MPa之間，平均為53.7 MPa，可以發現其抗壓強度保留率分別為91.7%與92.9%，即雖木材之抗壓強度會因火害而降低，但相對於抗彎強度，其受火害影響較低。柳杉火災被害材亦有類似之結果，卓志隆(1998)指出柳杉之縱向抗壓強度為31.0-38.8 MPa，本試驗之柳杉火災被害材抗壓強度為27.5-44.3 MPa，與文獻值相近或稍高，除可能係取材與齡級不同外，亦可能係選取抗壓試材時，多以外觀健全部分裁切成為小試材而進行試驗所致，故其反映出來的較屬於健全部之性質，與抗彎試材反映出整體性質有所差異。

有關抗壓強度與溫度之關係，王松永與丁昭義(1995)指出木材隨溫度上升會熱膨脹，結晶格子之間隔會變化而引起凝集力之降低，分子振動等所引起之機械強度減低，同時分子之滑動所引起應力集中之傾向會更顯著。過去的研究中，木材抗壓強度與溫度間之關係，大致可分為三種型態，一為抗壓強度剩餘率(P)依

溫度(T)之增加而單純呈直線之下降趨勢，即在 $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 288^{\circ}\text{C}$ 時， $P = 106 - 0.29T$ (Kundson and Schniewind, 1975)。其二亦為一直線方程式，但溫度區分為二部分，在 $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C}$ 時， $P = 118.8 - 0.9375T$ ； $100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 300^{\circ}\text{C}$ 時， $P = 37.5 - 0.125T$ (Konig and Walleij, 2000)。三為Young and Clancy (2001)所提出，在 $20^{\circ}\text{C} \leq T < 100^{\circ}\text{C}$ 時， $P = 115 - 0.75T$ ；在 $100^{\circ}\text{C} \leq T < 110^{\circ}\text{C}$ 時， $P = -760 + 8T$ ；在 $110^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$ 時， $P = 1168.9 - 0.444T$ ；在 $200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$ 時， $P = 240 - 0.8T$ 。故，基本上木材之抗壓強度是會隨溫度之增加而有下降之趨勢，對於木材受火害後，其木材各部位之抗壓強度與溫度之關係，可於後續試驗中進一步研究探討。

(四) 非破壞檢測技術之評估

表2為火災被害材各項非破壞檢測因子之自相關分析，結果指出密度、超音波速、打音音速、超音波動彈性模數、打音動彈性模數與抗彎強度、抗彎彈性模數間均有顯著之正相關，亦即利用這類參數均可有效地評估材料之抗彎性質。其中，對於大構件之木材而言，密度往往無法有效的作為評估木材抗彎性質之依據(Xu, 2002)，李佳如與楊德新(2010)研究亦指出密度與2 by 6與2 by 8杉木集成元等規格製品之抗彎彈性模數之相關性相當低($R^2 = 0.05$ -

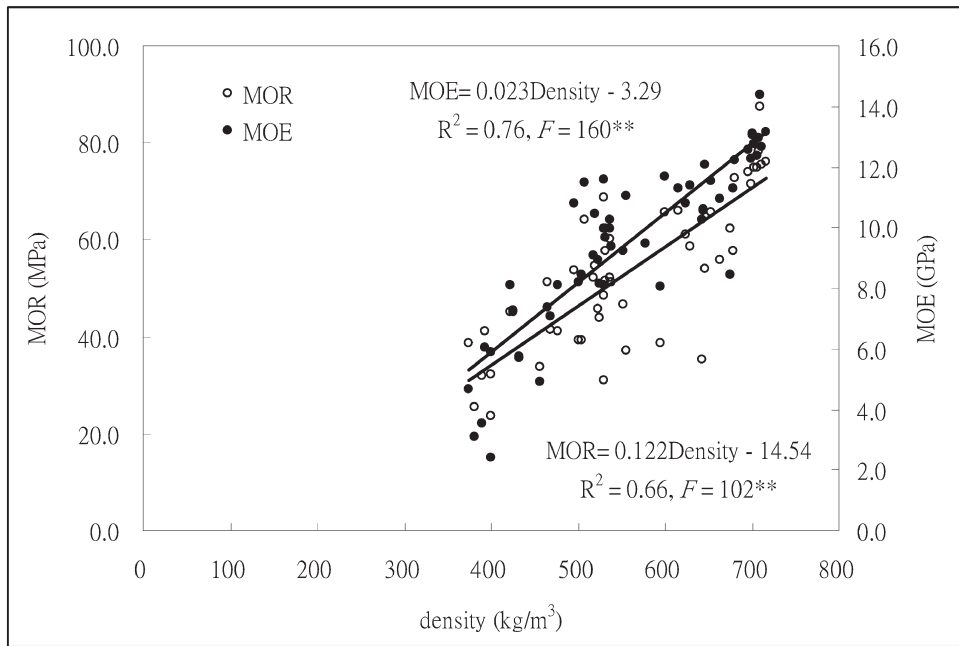


圖6. 火災被害材密度與抗彎性質之關係

Fig. 6. Relationships between density and static bending properties of fire-damaged wood

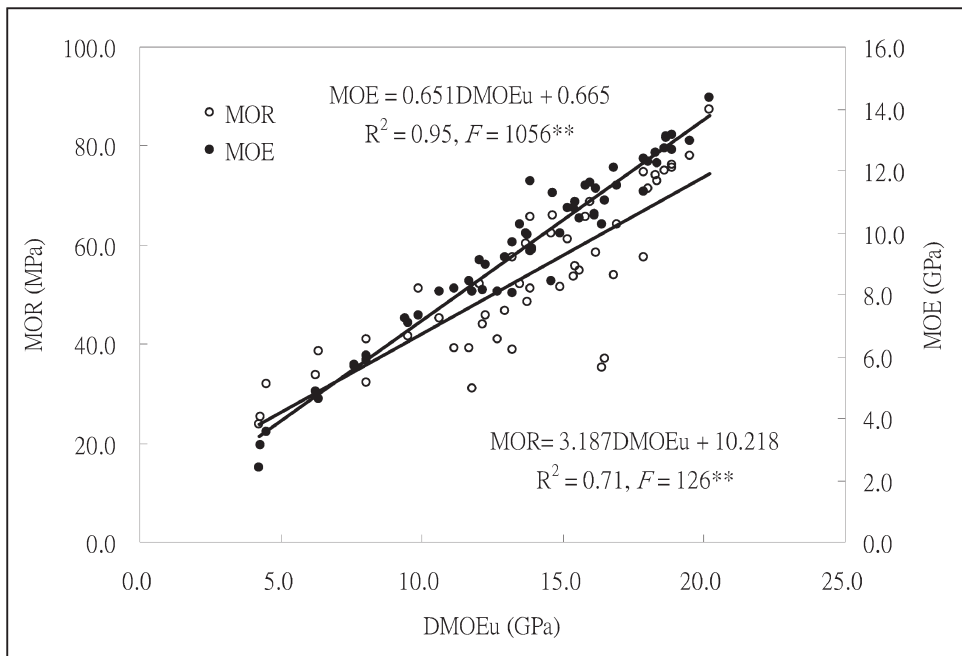


圖7. 火災被害材超音波動彈性模數與抗彎性質之關係

Fig. 7. Relationships between DMOEu and static bending properties of fire-damaged wood

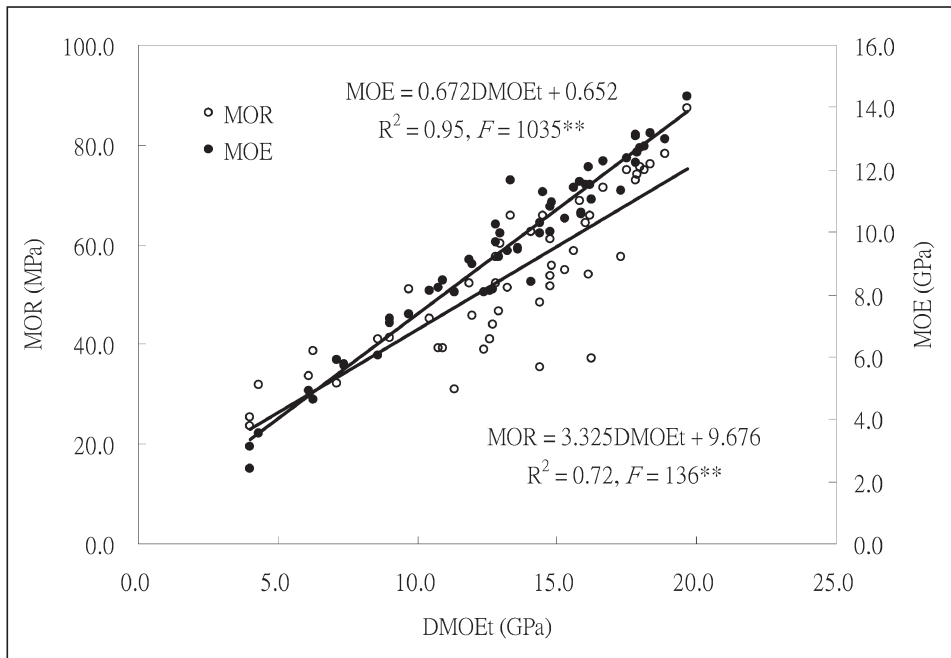


圖8. 火災被害材打音動彈性模數與抗彎性質之關係

Fig. 8. Relationships between DMOEt and static bending properties of fire-damaged wood

四、結論

本試驗以救國團溪頭青年活動中心之兩處木構建築火災被害材為試驗材料，經鑑定，其材種分別為柳桉木 (*Lauan, Shorea spp.*)、冰片木 (*Kapur, Dryobalanops spp.*)與柳杉 (*Japanese cedar, Cryptomeria japonica*)。在經歷約2h之火害後，去除其炭化層，三組試材之抗彎性質與抗壓性質分別為：作為樑結構用之柳桉木火災被害材抗彎強度為59.9 MPa，抗彎彈性模數為10.8 GPa，抗壓強度為48.4 MPa；冰片木火災被害材抗彎強度為52.4 MPa，抗彎彈性模數為9.6 GPa，抗壓強度為49.9 MPa；而作為柱體結構用之柳杉火災被害材之抗彎強度為32.8 MPa，抗彎彈性模數則為4.5 GPa，抗壓強度為39.1 MPa，整體而言，火災被害材之抗彎彈性模數保留率與抗壓強度保留率較抗彎強度保留率為佳。

以非破壞檢測技術評估火災後害材之抗彎性質時，兩種非破壞試驗法 (超音波法與打音

法) 與抗彎性質間均有良好之相關性，以動彈性模數評估抗彎彈性模數與抗彎強度，其 R^2 值分別為0.95與0.71-0.72，因此，未來考量資源之再利用性，欲針對火災被害材再利用時，可以此類非破壞檢測技術評估其抗彎性質。

五、謝誌

本研究承國立台灣大學實驗林管理處提供試材及經費補助(100A01)，特此致謝。

六、參考文獻

- 王松永 (2002) 商用木材。林產工業叢書1，中華林產事業協會印行。
- 王松永、丁昭義 (1995) 林產學上冊，台灣商務印書館股份有限公司，台北。
- 中華民國國家標準CNS 451 (2005) 木材密度試驗法，經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準CNS 452 (2005) 木材含水率試驗法，經濟部標準檢驗局。

- 中華民國國家標準CNS 453 (2005) 木材抗壓試驗法，經濟部標準檢驗局。
- 李佳如、楊德新 (2010) 應用非破壞檢測技術評估杉木集成元之抗彎性質。林業研究季刊 32(4) : 45-60。
- 卓志隆 (1998) 栽植距離對柳杉強度變異性影響之研究(I)-靜力機械性質。林產工業 17(3) : 453-470。
- 陳載永、陳合進 (1997) 火災後木質結構用材之強度檢測。中興大學實驗林研究彙刊 19(2) : 89-99。
- AITC (2004) Superior fire resistance. OT-04. American Institute of Timber Construction.
- Collier, P.C.R. (1992) Charring rates of timber. Study report. Branz: New Zealand, p. 34.
- Fredlund, B. (1988) A model for heat and mass transfer in timber structures during fire a theoretical, numerical and experimental study. Report, Lund Institute of Science and Technology, Sweden, p. 93.
- Konig, J. and L. Walleij (1999) One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations. Swedish Institute for Wood Technology Research, Stockholm. Report I.
- Konig, J. and L. Walleij (2000) Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires – Part 2: A design model for standard fire exposure. Swedish Institute for Wood Technology, Sweden. Research Report I 0001001.
- Kundson, R.M. and A.P. Schniewind (1975) Performance of structural wood members exposed to fire. Forest Products Journal 25: 23-32.
- Lau, W.C., R. White and I.V. Zeeland (1999) Modelling the charring behaviour of structural lumber. Fire and Materials. 23: 209-216.
- Njankouo, J.M., J.C. Dotreppe and J.M. Franssen (2004) Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. Fire and Materials 28:15–24.
- Schaffer, E.L. (1967) Charring rate of selected woods transverse to grain. Research paper FPL 69. Forest Products Laboratory, Madison, WI. p. 22.
- Smulski, S. (1997) Engineered wood products, a guide for specifiers, designers and users. PFS Research Foundation, Madison, WI. p.294.
- White, R.H. (1988) Charring rates of different wood species. Ph.D. dissertation. Madison University of Wisconsin, Madison, WI. p. 215.
- Xu, P. (2002) Estimating the influence of knots on the local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber. Wood Science and Technology. 36: 501–509.
- Yang, T.H., S.Y. Wang, M.J. Tsai and C.Y. Lin (2009a) The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. Building and Environment 44: 231-236.
- Yang, T.H., S.Y. Wang, M.J. Tsai, C.Y. Lin and Y.J. Chuang (2009b) Effect of fire exposure on the mechanical properties of glued laminated timber. Materials and Design 30:698-703.
- Young, S.A. and P. Clancy (2001) Compression mechanical properties of wood at temperature simulating fire conditions. Fire and Materials 25: 83-93