



公開
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e202

行政院農業委員會林務局111年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發 (2/3) (第2年/全程3年)**
(英文名稱)**The bonding technology and optimized process of Bamboo-bundle Laminated Lumber as the engineering bamboo (2/3)**

計畫編號：**111農科-7.4.4-務-e2(2)**

全程計畫期間：**自 110年1月1日 至 112年12月31日**
本年計畫期間：**自 111年1月1日 至 111年12月31日**

計畫主持人：**楊德新**
研究人員：**趙偉成、鄭雅文、陳佑安、姚建宏**
執行機關：**國立中興大學**



1111665



一、執行成果中文摘要：

本研究主要將原竹管輾碎為長束狀竹絲後，結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經蒸煮處理後再行熱處理製程，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製。同時與一般常見之竹集成板材進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性質，另探討材料對白腐菌 (*L. betulina*)、褐腐菌 (*L. sulphureua*)、台灣家白蟻 (*Coptotermes formosanus*) 抵抗能力。研究結果指出，三組長束狀竹層積材之密度值係介於1121-1231 kg/m³，顯著較一般之竹集成板材為高 (665-668 kg/m³)，其中，高度熱處理之長束狀竹層積材 (H) 亦具有最佳之尺寸安定性，其平衡含水率、吸水率與吸水厚度膨脹率分別為組間最低之6.43%、1.02%與0.19%。機械性質方面，三組長束狀竹層積材之抗彎強度將隨熱處理溫度之提升，而有減低之趨勢，然三者之抗彎彈性模數與表面硬度值則均較一般常見之竹集成板材為高，其中，又以中度熱處理長束狀竹層積材 (M) 具有最佳之MOE (10.94 GPa) 與表面硬度值 (64.28 N)。抗生物劣化性方面，無論係21日之抗白蟻試驗，抑或是12週之抗白腐菌與抗褐腐菌試驗中，均係以高度熱處理之長束狀竹層積材 (H) 具最低之質量減低率 (5.8%、4.4%、4.3%)，且與UV及UH兩組竹集成板材間具顯著之差異存在。

二、執行成果英文摘要：

In this study, the bamboo culms were crushed into long bamboo bundles , combined with the impregnated methods and heat treatment process, the crushed long bundles of bamboo were steamed and then subjected to heat treatment process, impregnated with PF Resin, and compacted with a hot press machine. At the same time, compared with common bamboo laminated timbers, the dimensional stability and various mechanical properties were evaluated. In addition, the biodegradation resistance of bamboo scrimber and the laminated bamboo timber with white rot fungi (*L. betulina*), brown rot fungi (*L. sulphureua*), and termites (*Coptotermes formosanus*) were discussed. The results indicated that the density of the three groups of bamboo scrimber were between 1121-1231 kg/m³, significantly higher than that of general bamboo laminated timber (665-668 kg/m³). The H group of bamboo scrimber also had the best dimensional stability, which equilibrium moisture content, water absorption rate and water absorption thickness swelling rate were the lowest among the groups at 6.43%, 1.02% and 0.19%, respectively. In terms of mechanical properties, the bending strength of the three groups of bamboo scrimber tended to decrease with the increasing of heat treatment temperature, but the modulus of elasticity and surface hardness of the three groups were higher than those of the laminated bamboo timber. , The M group of bamboo scrimber with moderate heat treatment had the best MOE (10.94 GPa) and surface hardness (64.28 N). In terms of resistance to biological degradation, no matter in the 21-day termite resistance test, or in the 12-week anti-white rot and anti-brown rot decay resistance tests, the H group of bamboo scrimber had the lowest mass lose rate (5.8%, 4.4%, 4.3%), and there was a significant difference camparing with the two groups of laminated bamboo timber.

三、計畫目的：

本年度(111)目標旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫擬結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經不同溫度之熱處理後，含浸熱硬化型PF 樹脂，並以熱壓





機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，另亦探討其耐生物劣化性質，以做為未來竹構建材用之基礎。並期待所研製之新型束狀竹層積材，可作為一室內外均適用之新型板材，同時亦可利用於建築結構等單元，藉此創造國產竹材不同之應用型態、拓展其銷售市場並提升其附加價值。

四、重要工作項目及實施方法：

本研究計畫「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發」於本年度之研究重點點旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫擬結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經不同溫度之熱處理後，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機壓成長束狀之竹絲，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其耐生物劣化之效能。其重要工作項目與實施方法如次：

一、長束狀竹絲之準備

本年度之研究係使用4年生之孟宗竹 (*Phyllostachys edulis*, Moso bamboo) 為試驗材料，於伐採後將圓筒狀原竹對剖為半圓形，再將竹青部分之蠟質去除後，以輾壓機壓成長束狀之竹絲。該長束狀竹絲再置於高壓蒸氣爐內進行2 h之蒸煮處理，蒸煮處理處理後，再進行高溫熱處理分別為170°C與190°C，完成後乾燥保存備用。

二、束狀竹層積材之製程

將長束狀竹絲置於溫度70 °C之烘箱中乾燥至含水率約2%後取出並浸漬於熱硬化型PF樹脂中，待7 min後取出，再次置於溫度70 °C之烘箱中乾燥至含水率約2%後，取出置於成型模板內，並進行熱壓製程成型。熱壓溫度與壓力分別設定為150 °C及60 kgf/cm²，待壓至目標厚度20 mm後持壓10 min。本研究共研製三種束狀竹層積材，分別為未處理之束狀竹層積材（編號：C）、中度熱處理（170 °C）之束狀竹層積材（編號：M）與高度熱處理（190 °C）之束狀竹層積材（編號：H），並與一般市面常見之竹側拼集成板材（編號：UV）及竹平接集成板材（編號：UH）進行物理、機械與抗生物劣化性之比較。

三、束狀竹層積材之物理性質試驗

1、含水率：

將試材置於溫度20°C，65% RH 之恆溫恆濕室中進行調濕處理約3 週達平衡狀態後取出，依 CNS 452 木材含水率試驗法進行試材含水率之計算。

2、密度：

依CNS 451 木材密度試驗法進行量測。將調濕後達平衡狀態之試材測量其質量 (kg) 及體積 (m³)，計算密度 (ρ)。

3、吸水率與吸水厚度膨脹率：

將試材放置於103 ± 2°C烘箱達絕乾後，量測其質量與厚度，再將試材浸漬於20 ± 1°C之水下25 mm處，每隔24 hr進行其重量與厚度變化之量測，至恆重為止。

四、束狀竹層積材之機械性質試驗

1、抗彎試驗





依CNS 454 木材抗彎強度試驗法，將調濕後達平衡狀態之試材量測各方向尺寸，跨距為試片厚度之14 倍，載重速度為5 mm/min，計算試材之抗彎強度（Modulus of rupture, MOR）與抗彎彈性模數（Modulus of elasticity, MOE）。

2、硬度試驗

依CNS 460木材硬度試驗法，於載重方向與纖維方向垂直下，以一直徑10 mm 之鋼球壓入竹材表面深度約0.32 mm 處，平均壓入速度為0.5 mm/min，並計算其勃氏硬度（H）。

五、束狀竹層積材之抗生物劣化性評估

1、抗白蟻性試驗：

依CNS 15756木材抗白蟻性試驗法進行室內試驗，供試白蟻採集自中興大學校園內之台灣家白蟻。食害操作前，將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥48 h，並測定質量。食害操作時，於容器內均勻加入20 g去離子水，接著於建築用砂上放置一尺寸為30 mm（長） \times 30 mm（寬） \times 1 mm（厚）之塑膠網，再將試材放置於塑膠網上，隨後置入台灣家白蟻之工蟻150隻、兵蟻15隻，共165隻白蟻，最後將飼育容器至於溫度 $28 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $80 \pm 5\%$ RH之陰暗環境21天。食害操作結束後，以清水拭去試材表面殘餘之建築用砂與白蟻分泌物，於室內自然風乾24 h後將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥48 h，並計算試材之質量減少率（Mass loss, ML）與白蟻死亡率（Termite mortality, TM）。

2、耐腐朽性試驗

依CNS 6717木材防腐劑之性能基準進行室內試驗。試驗菌株包含褐腐菌：硫色絢孔菌（*Laetiporus sulphureus*, LS）與白腐菌：樺褶孔菌（*Lenzites betulina*, LB）菌株皆購自台灣生物資源保存及研究中心。試驗使用直徑95 mm，高度70 mm之玻璃廣口瓶為培養容器，於瓶中加入由39 g瓊脂（Agar）與1 L蒸餾水混合而成之培養液30 mL後，經高溫高壓滅菌處理，於無菌之生物安全櫃中將試驗菌株移接至培養容器中，隨後將培養容器密封，並置於 25°C 、70%RH以上之生長箱，待菌絲佈滿培養基表面後即可進行腐朽試驗。腐朽試驗前，將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥48 h，並測定質量，腐朽試驗時於無菌之生物安全櫃內將經滅菌處理之試材每三塊一組，置於佈滿供試菌株之培養容器中，使其暴露於腐朽菌環境，接著將培養容器置於 25°C 、70%RH以上之生長箱進行試驗，經12週後取出試材並以清水去除試材表面殘留之菌絲，於室內自然風乾24 h後將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥48 h，測定試驗後之質量及補正試片之質量，並計算試材之質量減少率（Mass loss, ML）。

五、結果與討論：

本研究計畫「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發(2/3)」於本年度之研究重點旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經蒸煮處理後再行熱處理製程，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其抗生物劣化之效能。

（一）束狀竹層積材之物理性質分析





附表1為本研究研製之三種常束狀竹層積材與一般試售常見之兩種竹集成板之密度與含水率比較，結果顯示，三組束狀竹層積材之密度係介於 $1120\text{--}1230\text{ kg/m}^3$ 間，其中，以中度熱處理之束狀竹層積材（M組）之密度最高。此外，三者之密度值均顯著高於一般市售之竹層積板材（ $665\text{--}687\text{ kg/m}^3$ ），統計結果亦顯示三組束狀竹層積材與兩組一般市售之竹層積板材間具明顯之密度值差異。另一方面，若與本研究團隊以往對戶外用材所進行之研究比較，三組束狀竹層積材之密度值均高於常見之巴杜柳桉（*Shorea spp.*）、太平洋鐵木（*Intsia spp.*）、紅膠木（*Tristania spp.*）、乳桑木（*Bagassa guianensis*）、風鈴木（*Tabebuia spp.*）等樹種（趙偉成等2016）。此趨勢間接說明長束狀竹層積有作為戶外用材之潛力。

再則，束狀竹層積材密度顯著較一般市售竹集成板高之原因，主要係由於其研製過程中經熱硬化型樹脂之含浸，並再透過熱壓機進行高緻密化之壓製與硬化成型，有效減少長束狀竹條彼此間堆疊間隙，與其細胞內之空腔比例（Abdul Khalil et al., 2014）。Ang et al. (2014) 之研究中曾以PF樹脂含浸血桐屬樹種後進行熱壓，製成之浸壓材（Compreg wood）之密度，由處理前之 288 kg/m^3 經處後提升至 $543\text{--}688\text{ kg/m}^3$ ，密度值隨熱壓之壓力增加而上升。另對本研究所研製之三種束狀竹層積材之密度值進行組內比較可發現，三者之密度值並非隨熱處理條件增加而提高，反之，高度熱處理束狀竹層積材之密度值則有些許下降之趨勢，此現象說明高溫之熱處理條件會在處理過程中，使竹材之半纖維素等低分子量組成分產生降解，進一步導致試材於處理時產生少量之質量損失，進而降低其成品之密度。郭瑋玲和盧崑宗（2012）針對國產柳杉（*Cryptomeria japonica*）與相思樹（*Acacia confusa*）進行不同溫度之熱處理時亦有相似之趨勢，其將前述兩樹種分別進行 130°C 、 160°C 、 190°C 、 220°C 、 250°C 、 280°C 等6種不同溫度條件之熱處理後，試驗結果顯示，柳杉之密度值由處理前之 438 kg/m^3 ，逐漸降至 298 kg/m^3 (280°C)，而相思樹則密度由處理前之 804 kg/m^3 降至 747 kg/m^3 (280°C)。

由附表1中亦可見三種束狀竹層積材與一般市售竹集成板之含水率試驗結果，結果顯示五組試材經調濕後取出所測得含水率係以高度熱處理之束狀竹層積材（H組）為最低（6.43%），中度熱處理之束狀竹層積材（M組）次之（6.90%），含水率最高者為一般市售之竹平接集成板（UH組），為9.44%。統計結果顯示，經過熱處理之兩組束狀竹層積材的含水率，與其餘三組間具顯著之差異存在。而經過熱處理之束狀竹層積材含水率顯著較一般市售竹集成板為低之原因，係由於熱處理之製程將使竹材中較低分子量的半纖維素產生熱降解，相對地，易與水分結合之羥基（-OH）也隨之減少（林曉洪和林盈宏，2011；Herrera et al., 2014），以致有效降低熱處理束狀竹層積材之含水率。卓志隆和陳志昇（2014）曾利用國產杉木（*Cunninghamia lanceolata*）與桃花心木（*Swietenia macrophylla*）作為試材，分別進行處理溫度 170°C 、 190°C 、 210°C 、 230°C 與持溫時間1h、2h、4h及8h之熱處理改質，試驗結果顯示，兩樹種之含水率均隨處理溫度與持溫時間之增加，而有顯著下降之趨勢，其中，杉木由處理前之13.2%，經 190°C 持溫時間2h之熱處理後降至5.7%；而桃花心木則由處理前之13.5%，經 190°C 持溫時間2h之熱處理後降至4.8%。

附表2為三組束狀之層積材與兩組一般市售竹集成板之吸水率與吸水厚度膨脹率試驗結果。首先由吸水率之試驗結果顯示，三種束狀竹層積材之吸水率平均介於1.15%-1.59%間，其中又以高度熱處理之束狀竹層積材（H組）為最低，中度熱處理之束狀竹層積材（M組）次之。而三組束狀竹層基材之吸水率均明顯較一般市售之竹集成板（17.83%-23.11%）為低。統計結果亦顯示三組束狀竹層積材之吸水率與一般市售竹集成板間具顯著之差異。吸水厚度膨脹率方面，雖三組束狀竹層積材於浸水後之吸水厚度膨脹率與一般市售竹集成板間未有明顯之差距，然高度熱處理之束狀竹層積材（H組）仍有最低之吸水厚度膨脹率，其吸水厚度膨脹率為0.27%。





由前述之結果可發現，熱處理之製程可有效降低試材之吸水率與吸水厚度膨脹率，且隨熱處理條件之加劇，其成效也越為顯著，此原因與試材含水率會隨熱處理溫度之升高而有所降低相同，均與熱處理製程中，竹材之半纖維素等低分子量組成分降解有關，隨熱處理條件之加劇，受降解之半纖維含量增加，同時易與水分結合之羥基則隨之減少 (Kamperidou et al., 2013; Yang et al., 2016)。黃國雄等 (2013) 以國產麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*) 作為試材，將裁切之長方形麻竹試片分別進行處理溫度160 °C、180 °C、200 °C、220 °C與持溫時間1h、2h、4h、8h及12h之熱處理改質後，再含浸於水中兩週，取出量測其弦向與徑向之尺寸變化結果顯示，未處理麻之竹試片於兩週浸水試驗後，弦向與徑向之尺寸膨脹率為9.17%與16.39%，而經處理溫度220°C、持溫時間2小時之熱處理後，試片弦向與徑向之尺寸膨脹率則降至7.96%與13.27%。此外，本研究除熱處理製程，亦將熱處理後之長束狀竹絲含浸於熱硬化型樹脂中，再行熱壓硬化後製成，此相似於浸壓材之製備方式，透過熱硬化型樹脂於硬化前與長束狀竹絲纖維素內剩餘羥基之反應，及硬化後填充細胞壁與細胞腔內之空隙等作用，有效阻絕水分與束狀竹層積材之結合，進而增進其尺寸安定性 (Adawiah et al., 2012; Ashaari and Bakar, 2010)。Gabrielli and Kamke (2010) 將雜交之楊木 (*Populus deltoides* and *trichocarpa*) 樹種含浸於熱硬化型PF樹脂後進行熱壓緻密化，並試材含浸於試溫水中24 h，取出絕乾後再行2 h沸水之浸泡，量測之吸水厚度膨脹率結果顯示，未處理試材之吸水厚度膨脹率為76.2%，而經熱硬化型樹脂浸壓處理者則降至9.2%，具有近88%之減低效果。依據前述結果可說明，束狀竹層積材藉熱處理與浸壓處理兩偕同之製程，可有效降低試材與水分之結合，同時提升其尺寸安定性，相較於一般市售之竹集成板，更具備應用於戶外環境之潛力。

(二) 束狀竹層積材之機械性質分析

附表3為三組束狀竹層積材與2組市售竹集成板材之抗彎性質與表面硬度，結果顯示，經中度熱處理 (M組) 與高度熱處理 (H組) 之束狀竹層積材具較佳之抗彎彈性模數值 (Modulus of elasticity, MOE)，兩者分別為10.72 GPa及10.60 GPa。其MOE值亦較市售之竹集成板為高。統計分析結果同樣顯示M組及H組束狀竹層積材之MOE值與UV及UH兩組市售竹層積材間具顯著之差異。而造成束狀竹層積材之MOE較佳之原因，係由於長束狀竹絲所含浸之PF樹脂會於熱壓成型階段積聚於試材表面，以致束狀竹層積材之上下兩側（即壓縮側與引張側）相對緻密，藉此提升其抗彎彈性模數 (Hartono et al., 2016; Dong et al., 2015)。過去亦有浸壓材之相關文獻具相似之試驗結果，Sharma et al. (2021) 將糖棕 (*Borassus flabellifer*) 試材含浸PF樹脂並進行緻密化處理，而後測定其MOE值顯示，相較於未處理之唐棕試材，其MOE由3.88 GPa上升至5.18 GPa，提升近34%。

而在抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 方面，除高度熱處理組 (H組) 外，未處理與中度熱處理束狀竹層積材之MOR值則與市售之竹集成板相近，其MOR值分別為107.71 MPa與102.13 MPa。然由MOR值之試驗結果亦可發現，隨熱處理溫度之提升，束狀竹層積材之MOR值具下降之情況，此現象主要係由於越高溫度之熱處理條件，將增快材料非結晶區域內半纖維素受熱降解之速率，熱降解產生之有機酸類物質將進一步導致纖維素之酸水解反應，進而影響其機械性能 (Percin et al., 2016)。上述現象與Yang et al. (2016) 所進行之國產孟宗竹材 (*Phyllostachys pubescens*, Moso bamboo) 抗彎強度試驗之結果具相似之趨勢，結果顯示無論係以氮氣、空氣或以油為熱處理介質，以210°C、4 hr為熱處理條件之竹材其MOR值則較以150°C、4 hr熱處理者降低38%-39%。





另一方面，附表3中亦顯示三組束狀竹層積材與兩組市售竹集成板之表面硬度值，結果顯示，各組試材之表面硬度值與其MOE值有相似之趨勢，均係以M組（62.25 N）與H組（61.59 N）具較佳之表面硬度值。此外，由統計分析之結果亦可說明各組束狀竹層積材之表面硬度值與市售竹集成板間存在顯著之差異。再則，造成兩種試材具顯著表面硬度值差異之原因，除前述提及束狀竹層積材於熱壓成型階段，材料表面會形成高緻密化之PF樹脂層外，填充於細胞壁與細胞腔內之熱硬化型PF樹脂，於硬化後形成之三次元網狀結構，將有效支撐細胞內外之空隙，減緩竹纖維於載重下之變形及饋陷（Dungani et al., 2014）。

（三）束狀竹層積材之抗生物劣化性

附表4為三組束狀竹層積材與兩組一般試售竹集成板之抗白蟻性，此外，為証實束狀竹層積材應用於戶外環境之可行性，另取柳杉邊材（J-U組）與K4等級之ACQ保存處理柳杉邊材（J-K4組）一併進行比較。結果顯示，經21日之實驗室級抗白蟻性試驗，三組束狀竹層積材之質量減少率平均介於5.5%-6.3%之間，質量減少率最低者為高度熱處理之束狀竹層積材（H組），中度熱處理束狀竹層積材（M組）次之（5.9%），三者之質量減少率結果雖較K4等級之ACQ保存處理柳杉邊材為高，且未達到中華民國國家標準CNS總號15756木材抗白蟻性試驗法中所規範之有效基準值（質量減少率：3%以下），然仍顯著低於一般市售之竹集成板材（11.2%-15.0%）與作為對照組之未處理柳杉邊材（18.9%），統計分析結果亦顯示三種束狀竹層積材於抗白蟻性試驗之質量減少率與UV及UH兩組竹集成板材間具顯著之差異存在。由於三組束狀竹層積材均經過含浸熱硬化型樹脂與熱壓硬化之製程，故高度緻密化之試材本體使白蟻較難以取食，此現象與現行戶外用材多選用密度高於700 kg/m³之闊葉樹種具一定之關聯性。Bakar et al. (2013)以27年生之油棕梠（*Elaeis guineensis*）作為試材，進行PF樹脂之含浸與熱壓硬化製程後進行實驗室級抗白蟻性試驗，試驗結果顯示，前述含浸與熱壓之製程可有效降低油棕梠受白蟻食害之可能，其質量損失率由未處理之27.94%顯著降至9.58%，說明原本低密度之材料透過浸壓製成高度緻密化（Densification）之流程為提升材料生物耐久性之可行性方式。另一方面，在白蟻致死率之試驗結果上，三組束狀竹層積材與一般市售之竹集成板間並未具顯著之差異，惟高度熱處理之束狀竹層積材（H組）之白蟻致死率與K4等級之ACQ保存處理柳杉邊材（J-K4組）測值接近。然統計分析結果則指出無論係對照組、束狀竹層積材抑或是一般市售之竹集成板材，七組材料於白蟻致死率間並無顯著之差異。

附圖1顯示於21日抗白蟻性試驗後，未處理束狀竹層積材（C組）、高度熱處理束狀竹層積材（H組）與作為對照之柳杉邊材（J-U組）與K4等級之ACQ保存處理柳杉邊材（J-K4組）於21日實驗室級抗白蟻性試驗前後之白蟻食害成像，由於四者均有受白蟻食害之情形，故本研究參考ASTM D3345-17標準中木塊受白蟻食害後之評級方式，將試塊依其外觀受食害之嚴重程度分為0-10級。圖中可見作為空白組之柳杉邊材試塊（質量減少率18.9%，高於中華民國國家標準CNS總號15756木材抗白蟻試驗法中所規範之試驗有效性基準值15%），沿年輪走向之春材部分具大面積受白蟻食空之現象，故將其外觀受食害評級為4級（Heavy），而K4等級之ACQ保存處理柳杉邊材（J-K4組）及未處理束狀竹層積材（C）、高度熱處理束狀竹層積材（H）三組試塊於21日之實驗室級抗白蟻性試驗後則僅有試塊邊緣受白蟻輕微食害，以致產生小型缺口及凹凸不平等現象，因此將此三者之外觀受食害評級為9級（Light attack）。

附表5為各組束狀竹層積材與市售竹側拼集成板及竹平接集成板之耐腐朽性，另本研究團隊亦同時進行未處理柳杉邊材（J-U組）與K4等級ACQ保存處理柳杉邊材（J-K4組）之耐腐朽試驗，分別作為對照組及現行常見戶外用材之比較。試驗結果顯示，經12週褐腐菌（*Laetiporus sulphureus*, LS）之耐腐朽性試驗，三組束狀竹層積材中係以高度熱處理者（H組）具有最低之質量減少率，其質量減少率為4.6%，雖仍較K4等級ACQ保存處理柳杉邊材（1.6%）為高，然統計分析結果顯示與兩組市售竹集成板間具有顯著之差異存在。製程上，高度熱處理之束狀竹





層基材由於具有緻密化 (Densification) 之樹脂外層包覆，故較一般竹材與未處理之木材不易受到腐朽菌之侵害 (Lee and Ashaari, 2015; Biziks et al., 2021)，此外，其原料係以經熱處理改質之長束狀竹絲製成，極低之含水率與成品不易吸濕之特性，將不利於腐朽菌之生長繁殖 (Candelier et al., 2016; Gerardin, 2016)。而白腐菌 (*Lenzites betulina*, LB) 之耐腐朽試驗結果趨勢與褐腐菌相似，均係以K4等級ACQ保存處理柳杉邊材 (J-K4組) 具最低之質量減少率 (1.3%)，H組束狀竹層積材次之 (4.8%)，再次者為依序為M組 (7.6%)、C組 (8.9%) 之試材，耐腐朽性最差者則為UH組之市售竹集成板 (33.6%)。此外，於表5中亦可發現竹材與木材對不同種類腐朽菌之耐受性具顯著之差別，舉例而言，於相同之試驗天數下，未處理柳杉邊材抵禦白腐菌侵害生長之能力顯著較褐腐菌為高，然以未處理竹片拼接而成之UV與UH兩組竹集成板則具截然相反之趨勢，造成此現象之原因係與兩者不同之組成分比例有關。

附圖2為各組長束狀竹層積材、市售之竹集成板以及作為對照之未處理柳杉邊材與K4等級ACQ保存處理柳杉邊材，經12週褐腐菌 (*Laetiporus sulphureus*, LS) 耐腐朽性試驗後的成像，由於各組試塊均受到程度不一之褐腐菌侵害，因此本研究參考AWPA E14-16標準將受褐腐菌侵害之試塊外觀進行0-10級之評級，藉以量化其個別受侵害之情況。圖中可見，試材外觀受侵害最嚴重者為未處理之柳杉邊材 (J-U組)，其呈現嚴重之變形與內部潰陷之情況，由於受褐腐菌侵害之橫斷面面積已超過60%以上，故將其評級為4級 (Very severe attack)。而市售之竹側拼集成板 (UV組) 於12週之褐腐菌耐腐朽性試驗後，已產生去木質化 (Delignification) 反應，出現分層剝離之現象，惟材料表面尚屬完整之情況故將其評級為7級 (Moderate/Severe attack)。另三組束狀竹層積材與K4等級ACQ保存處理柳杉邊材試塊表面均無明顯受褐腐菌侵害之痕跡，未有空洞、剝離且保持完整，其質量之減少僅可能出現於試塊四周些許起毛與微鋸齒之現象，由於受腐朽之橫斷面面積低於3%以下，故評級為9級 (Traces/suspect)。圖3則為各組試材經12週白腐菌 (*Lenzites betulina*, LB) 耐腐朽性試驗後的表面成像，其呈現之趨勢與褐腐菌相似，均係未處理之柳杉邊材 (J-U組) 與竹側拼集成板 (UV組) 具較顯著之白腐菌危害，其中，前者之春材部分受白腐菌之侵害後呈現輕微海綿狀簍空之現象，而後者則出現中等面積之絲狀起毛與表層剝離位移之情況，由於受侵害之面積達30-50%間，故將兩者評級為6級 (Severe attack)。其餘4組試材表面保持完整，僅少部分之試塊邊緣具些微起毛及鋸齒之留存，受腐朽菌侵害之橫斷面面積均為3%以下，故其外觀受腐朽侵害之評級為9級 (Slight attack)。

六、結論：

本研究計畫「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發(2/3)」於本年度之研究重點旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經蒸煮處理後再行熱處理製程，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其耐生物劣化之效能。

1. 完成長束狀竹絲之製備，並將不同處理條件之長束狀竹絲製成束狀竹層積材。本研究所研製三種束狀竹層積材，分別為未處理之束狀竹層積材 (編號：C)、中度熱處理 (170°C) 之束狀竹層積材 (編號：M) 與高度熱處理 (190°C) 之束狀竹層積材 (編號：H)。

2. 針對研製之三種束狀竹層積材與市售竹集成板之密度與含水率試驗結果顯示，三組束狀竹層積材之密度值係介於 $1121\text{-}1231 \text{ kg/m}^3$ ，顯著較一般常見之竹集成板材為高 ($665\text{-}668 \text{ kg/m}^3$)。





)。含水率則係以中度熱處理束狀竹層積材(M)與高度熱處理束狀竹層積材(H)兩組較低，分別為6.90%與6.43%。

3. 吸水率與吸水厚度膨脹率之試驗結果顯示，束狀竹絲無論是否經過熱處理改質，製成之束狀竹層積材之吸水率與吸水厚度膨脹率均明顯較竹集成板材為低，且隨熱處理溫度之提升，三者之吸水率具減低之趨勢。

4. 機械性質方面，三組束狀竹層積材之抗彎強度將隨熱處理溫度之提升，而有減低之趨勢，然三者之抗彎彈性模數與表面硬度值則均較一般常見之竹集成板材為高，其中，又以中度熱處理束狀竹層積材(M)具有最佳之MOE(10.72 GPa)與表面硬度值(62.25 N)。

5. 完成三種束狀竹層積材與兩種市售竹集成板之實驗室級21日抗白蟻性試驗，結果顯示，三組束狀竹層積材之質量減少率平均介於5.5%-6.3%之間，較一般常見之竹集成板材為低(11.2%-15.0%)。而白蟻致死率方面，經統計分析結果顯示5組試材並未有顯著之差異存在。

6. 12週之耐腐朽性試驗中，除ACQ保存處理柳杉邊材外，高度熱處理束狀竹層積材對褐腐菌與白腐菌均具有最低之質量減少率(4.6%、4.8%)，且其抗腐朽之能力相較於兩組市售竹集成板，則具有顯著之差異存在。

七、參考文獻：

1. 中華民國國家標準CNS 451 (2013) 木材密度試驗法。經濟部標準檢驗局。
2. 中華民國國家標準CNS 452 (2013) 木材含水率試驗法。經濟部標準檢驗局。
3. 中華民國國家標準CNS 454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。
4. 中華民國國家標準CNS 454 (2013) 木材硬度試驗法。經濟部標準檢驗局。
5. 中華民國國家標準CNS 6717 (2011) 木材防腐劑之性能基準。經濟部標準檢驗局。
6. 中華民國國家標準CNS 15756 (2014) 木材抗白蟻性試驗法。經濟部標準檢驗局。
7. 王松永、周應松(1990)竹材複合嵌板之熱傳導率與靜曲特性，竹材綜合利用與加工。林產工業叢書。11:85-102。
8. 王瀛生、陳載永(1990)竹材廢料製造粒片板、竹管蜂巢板及滾形粒片板，竹材綜合利用與加工。林產工業叢書。11:157-176。
9. 台灣區合板工業同業公會(2021)台灣合板工業。台灣區合板同業公會。
10. 呂錦明(2010)台灣竹圖鑑。晨星出版社。pp. 4。
11. 李志璇(2012)三種熱處理介質對孟宗竹基本性質之影響。國立中興大學森林學系碩士學位論文。
12. 卓志隆、陳志昇(2014)熱處理對三種國產人工林木材力學性質之影響。林產工業。33(1):1-12。
13. 林曉洪、林盈宏(2011)熱處理木材之性質。林業研究季刊。33(1):91-108。
14. 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬(2015)第4次全國森林資源調查成果概要。台灣林業。41(4):3-13。
15. 邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬(2015)第4次全國森林資源調查成果概要。台灣林業。41(4):3-13。
16. 張誌仁、張豐吉、杜明宏(2004)伐採月份對麻竹及桂竹抗蟲性之影響。林產工業。23(2):157-166。
17. 郭瑋玲、盧崑宗(2012)不同溫度熱處理柳杉與相思樹木材之特性。林業研究季刊。34(4):269-286。





18. 黃國雄 (2014) 淺談熱處理竹材之基本性質。林業研究專訊。21(1):43–45。
19. 趙偉成、鄭雅文、林育群、陳俞甯、楊德新 (2016) 九種戶外用材之物理力學性質及其抗生物劣化性評估。林業研究季刊。38(1)：21–31。
20. 謝堂洲 (1976) 竹材之防腐、防蟲、防霉。林業叢刊10。
21. Abdul Khalil, H. P. S., Dungani, R. Mohammed, I. A. Hossain, Md. S. Aprilia, N. S. Budiarto and E. Rosamah (2014) Determination of the combined effect of chemical modification and compression of agatis wood on the dimensional stability, termite resistance, and morphological structure. Bioresources. 9(4):6614-6626.
22. Abdullah, C. K., M. Jawaaid, A. K. Shawkataly and N. F. M. Rawi (2013) Termite and borer resistance of oil palm wood treated with phenol formaldehyde resin. Journal of Industrial Research & Technology. 3(1):41-46.
23. Ang, A. F., A. Zaidon, E. S. Bakar, S. M. Hamami, U. M. K. Anwar and M. Jawaaid (2014) Possibility of improving the properties of Mahang wood (*Macaranga* sp.) through phenolic compreg technique. Sains Malaysiana. 43(2):219-225.
24. Ashaari, Z., E. S. Bakar and P. M. Tahir (2010) Compreg Laminates From Low Density Tropical Hardwoods. In Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe-Timber Committee. 11-14.
25. ASTM International (2017) D3345-17 Standard test method for laboratory evaluation of solid wood for resistance to termites.
26. American Wood Protection Association (2016) E14-16 Standard method of evaluating wood preservatives in a soil bed.
27. Baker, E. S., J. Hao, Z. Ashaari and A. C. C. Yong (2013) Durability of phenolic-resin-treated oil palm wood against subterranean termites a white-rot fungus. International Biodeterioration & Biodegradation. 85:126-130.
28. Biziks, V., S. Bicke, G. Koch and H. Militz (2021) Effect of phenol-formaldehyde (PF) resin oligomer size on the decay resistance of beech wood. Holzforschung. 75(6):574-583.
29. Candelier, K., M. F. Thevenon, A. Petrisans, S. Dumarcay, P. Gerardin and M. Petrisans (2016) Annals of Forest Science. 73:571-583.
30. Dungani, R., M. N. Islam, H. A. Khalil, Y. Davoudpour and A. Rumidatul (2014) Modification of the inner part of the oil palm trunk (OPT) with oil palm shell (OPS) nanoparticles and phenol formaldehyde (PF) resin: Physical, mechanical, and thermal properties. BioResources. 9(1): 455-471.
31. Dong, Y. M., Y. T. Yan, K. L. Wang, J. Z. Li, S. F. Zhang, C. L. Xia, S. Q. Shi and L. P. Cai (2015) Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation. European Journal of Wood and Wood Products. 74(2):177-184..
32. Gabrielli, C. P. and F. A. Kamke (2010) Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. Wood Science and Technology. 44:95-104.
33. Gerardin, P. (2016) New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood-a review. Annals of Forest Science. 73: 559-570.





34. Habibi, M. K., A. T. Samaei, B. Gheshlaghi, J. Lu and Y. Lu (2015) Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: Underlying mechanisms. *Acta Biomaterialia* 16:178-168.
35. Hartono, R., W. Hisayat, I. Wahyudi, F. Febrianto, W. Dwianto, J. H. Jang and N. H. Kim (2016) Effect of phenol formaldehyde impregnation on the physical and mechanical properties of soft-inner part of oil palm trunk. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*. 44(6): 842-851.
36. Herrera, R., X. Erdocia, R. Llano-Ponte and J. Labidi (2014) Characterization of hydrothermally treated wood in relation to changes on its chemical composition and physical properties. *Journal of analytical and Applied Pyrolysis*. 107:256-266.
37. Huang, P., W. S. Chang, M. P. Ansell, Y. J. Chew and A. Shea (2015) Density distribution profile for internodes and nodes of *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo) by computer tomography scanning. *Construction and Building Materials*. 93:197-204.
38. Kamperidou, V., I. Barboutis and V. Vasileiou (2013). Response of colour and hygroscopic properties of Scots pine wood to thermal treatment. *Journal of forestry research*. 24(3):571-575.
39. Kim, J. J., S. S. Lee, J. B. Ra, H. Lee, N. Huh and G. H. Kim (2011). Fungi associated with bamboo and their decay capabilities. *Holzforschung*. 65(2): 271-275.
40. Lee, C. H., M. J. Chung, C. H. Lin and T. H, Yang (2012) Effect of layered structure on the physical and mechanical properties of laminated moso bamboo (*Phyllosachys edulis*) flooring. *Construction and Building Material*. 28:31-35.
41. Lee, S. H. and Z. Ashaari (2015) Durability of phenolic-resin-treated sesenduk (*Endospermum diadenum*) and jelutong (*Dyera costulata*) wood against white rot fungus. *European Journal of Wood and Wood Products*. 73:553-555.
42. Li, H. T., Q. S. Zhang, D. S. Huang and A. J. Deeks (2013) Compressive performance of laminated bamboo. *Composites: Part B*. 54:319-328.
43. Liese, W. (1987) Research on bamboo. *Wood Science and Technology*. 21:189-209.
44. Lo, T. Y., H. Z. Cui and H. C. Leung (2004) The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. *Materials. Letters*. 58:2595-2598.
45. Luo, H., L. Yue, N. Wang, H. Zhang and X. Lu (2014) Manufacture of binferless fiberboard made from bamboo processing residues by steam explosion pretreatment. *Wood Research*. 59(5):861-870.
46. Okahisa, Y., T. Yoshimura and Y. Imamura (2006) Seasonal and height-dependent fluctuation of starch and free glucose contents in moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its relation to attack by termites and decay fungi. *Journal of Wood Science*. 52(5):445-451.
47. Percin, O., H. Peker and A. Atilgan (2016) The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis lipsky*) wood. *Wood Research*. 61(3):443-456.





48. Qi, J. Q., J. L. Xie, X. Y. Huang, W. J. Yu and S. M. Chen (2014) Influence of characteristic inhomogeneity of bamboo culm on mechanical properties of bamboo plywood: effect of culm height. *Journal of Wood Science*. 60:396-402.
49. Sharma, S. K. and B. U. Kelkar (2021) Effect of densification on certain physical and mechanical properties of inner soft wood of *Borassus flabellifer* L. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*. 18(1):39-44.
50. Sinha, A., D. Way and S. Mlasko (2014) Structural performance of glued laminated bamboo beams. *Journal of Structural Engineering*. 140(1):04013021.
51. Sulastiningsih, I. M. and Nurwati (2009) Physical and mechanical properties of laminated bamboo board. *Journal of Tropical Forest Science*. 21:246-251.
52. Sulthoni, A. (1985) Traditional preservation of bamboo in Java, Indonesia. In Recent Research on Bamboos. Proceedings of the International Workshop. pp. 349-358.
53. Sun, B L., X. H. Wang and J. L. Liu (2013) Changes in dimentional stability and mechanical properties of *Eucalyptus pellita* by melamine-urea-formaldehyde resin impregnation and heat treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71:557-562.
54. Yang, T. H., C. H. Lee, C. J. Lee and Y. W. Cheng (2016). Effects of different thermal modification media on physical and mechanical properties of moso bamboo. *Construction and Building Materials*. 119:251-259.





行政院農業委員會林務局111年度主管一般科技計畫 111年度細部計畫期末報告

計畫名稱：束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發

(英文名稱) The bonding technology and optimized process of Bamboo-bundle

Laminated Lumber as the engineering bamboo (2/3)

計畫編號： 111農科-7.4.4-務-e2 (2)

全程計畫期間： 110年1月1日至 112年12月31日

本年計畫期間： 111年1月1日至 111年12月31日

細部計畫主持人： 楊德新

執行機關： 國立中興大學





一、前言

近年，隨國人經濟水準之提升，對生活品質之要求與注重程度亦有上升之趨勢，此外，配合綠建材政策之推廣與環保意識之抬頭，消費者對木材與木質材料之接受度與需求量亦隨之提高。依據台灣區合板製造輸出同業公會（2021）統計資料顯示，我國於 2011 至 2020 年間，木材與木質材料相關製品中，以製材進口量最多 ($1,252,590\text{ m}^3$)，其次為合板、單板類 ($853,018\text{ m}^3$) 及原木 ($562,313\text{ m}^3$)，平均國內每年之木材消費量計有 $500\sim600$ 萬 m^3 ，可見我國木質材料消費量極大，民眾對木材與木質材料之需求有一定之依賴性存在。然由於林木資源長年仰賴進口，以致我國現時之木材自給率仍不足 1%，而國內每年木材消費量需求未減，為供應持續增加中的消費量，可能無形中助長非法砍伐林木的行為，成為國際詬病之對象。此外，長期的木材自給率低下，致使我國的木材原料受限於外國之貿易情勢，林木產品價格亦容易受國際市場波動。而長途之跨國運輸，無形中也增加全球二氧化碳排放量，與現今國際間提倡之環保節能目標背道而馳。另一方面，全球之原木數量或高品質木材正逐年減少，在面對環境保護、氣候變遷與能源供給等交互衝擊下，致使許多國家訂立法規禁止或減少砍伐。然隨著人口數目的急劇成長，除木材之應用外，思考並尋找具有相似兼具生態特性之材料為當務之急，而竹材即為一種具有類似性質且富含發展潛力的生態材料。

竹，於植物分類學上屬禾本科 (*Gramineae*) 中之竹亞科 (*Bambusoideae*)，其主要之分布大致可分為美洲、非洲及亞洲等三大竹區 (Liese, 1985；Tewari, 1992)，而台灣因位於熱帶與亞熱帶之交替地區，此得天獨厚之地形氣候條件，極適合竹類之繁衍生長，故自古以來便蘊含大量且豐富之竹類資源，根據林務局 2015 年第四次台灣森林資源及土地利用調查資料指出，台灣全島之森林覆蓋率為 60.71%，其中竹林面積為 112,549 公頃，占森林面積 5.12%，估計全台約有 158,133,232 支竹材之蓄積量 (邱立文等, 2015)。根據呂錦明 (2010) 之整理，台灣共有竹類 89 種，其中為台灣原生者 共計有 25 種，再依各竹種之經濟價值進行區分，台灣前六大經濟竹種除綠竹為主要產筍竹種外，其餘的桂竹、孟宗竹、





麻竹、刺竹、長枝竹等均有廣泛且不同之應用範疇，包括建材類（鷹架、防風牆、地板、壁板及裝修用材）、農漁用具（香蕉支柱、蚵架）、運動用品（球棒、竹劍）、生活用品（竹籤、竹筷、竹簾、竹蓆）等。相較於木材，竹材之優勢包括生長快速、收穫期短及高抗拉強度等特性，為現今重要之森林非木材產品。且於竹類之生長季節中，平均僅需 5-11 週即長大成材，4 年生以上竹齡多已達成熟狀態，亦說明其生長與更新之速率遠較林木所需時間為短。

除上述之應用外，國內外已有多種竹層積複合材等各式輕型結構用材之研發，如竹纖維板（陳載永等，1990；Luo *et al.*, 2014）、竹粒片板（王瀛生、陳載永，1990）、竹合板（王松永、周應松，1990；Qi *et al.*, 2014）等。而近年於利用及研究上最為廣泛者則為以竹片作為基材，行側拼或平接集成方式製成之竹集成板類（Sulastiningih and Nurwati, 2009；Li *et al.*, 2013）。Sinha *et al.* (2014) 將竹片以異氰酸鹽類膠合劑進行膠合，製作尺寸與一般市售實木板材相仿之 2- by 6-in 雙層側拼竹集成板材（Laminated bamboo lumber, LBL），試驗結果顯示，該試材之抗彎強度值為 89.2 MPa，顯著高於同尺寸之花旗松規格材 (48.0 MPa)，而抗彎彈性模數值具 12.19 GPa 之表現則與花旗松規格材相當 (12.85 GPa)。本研究團隊亦曾進相關之竹集成板類研究，該研究指出將孟宗竹竹片以 PRF 樹脂進行不同集成方式之板類製作，尺寸安定性之試驗結果顯示，直交式集成者相較於側拼與平接之集成方式具有較低厚度膨脹率、吸水率及線性膨脹率，同時直交式竹集成板材亦有足夠之抗彎彈性模數表現 (87.5 MPa)，係可作為地板用材之潛力材料 (Lee *et al.*, 2012)。然不可諱言，構成此類竹及成品之竹集成元，自砍伐至使用製造階段，亦有乾裂、黴害、變色、腐朽、蟲蟻蝕害等，且在儲存過程中，竹材之澱粉、蛋白質與水分等，亦受微生物之侵襲而危害竹材品質，更甚者有研究指出竹材對於生物劣化因子，比木材更易受危害 (Liese, 1987)，故為加強竹材之利用性，針對其保存處理之研究則顯得格外之重要。

目前國內於竹材建材之應用多以原竹類進行，110 年度，在台灣竹會與結合建築師的努力下，於嘉義開啟了六座竹構設施的示範建築，其所使用的便是以原





竹為基礎，可謂為國內近年來開啟較大規模對於竹構建築的重視，然前述對於原竹類的保存與耐久處理、工法均須格外重視，以利竹構建築之生命週期；此外，在初開啟竹構建材應用時，原竹為首要考量，除具有就地取材之便利外，也減少加工製程之不便，對於初期發展有利，惟對於長期發展竹構工程而言，原竹缺乏規格尺寸、在目前工程設計多以構件作為接合設計下，較為不便。次為原竹之保存處理較不易，同時原竹之強度分級以及等級間強度性質之確保，目前亦尚有欠缺，對於提供品質穩定之原竹而言，較難達成；三則為規格尺寸之建立，若能如同木材建立規格尺寸，對於竹材之應用性將能提升，於市場露出面向更能擴展，對於規格竹材之建立以及品質確保實為推動工程竹材發展重要的課題。

本計畫目的在研發具有耐久性與工程竹材應用可行性之束狀竹層積材，評估其各項工程性能（物理性質、機械性質、耐生物劣化性），提出可供竹構建築參考依據，以強化竹產業於建築產業應用之可行性，並開創竹構造之契機。





二、前人文獻

由建材之角度看竹材，除機械特性外，其首要考慮者即是竹材耐久或抗蟲特性。一般認為竹材因富含澱粉與醣類，因此為蟲類或菌類寄生之優良營養體，且竹材經砍伐後，內部養分易發黴及招致蟲害，這種侵害與澱粉之還原醣有關，且澱粉含量越高，其受害有越嚴重之趨勢（謝堂洲，1976；Sulthoni, 1985；張誌仁等，2004）。其中，生物劣化方面又以竹蠹蟲為主要為危害竹材之種類，經研究其又與竹材砍伐季節以及竹種有顯著相關（陳載永等，1994）。一年中，4月為竹蠹蟲發生之猖獗季節。8月以後漸減，10月則未發現蟲害，竹種間以麻竹危害最為嚴重，長枝竹與刺竹次之，孟宗竹與桂竹較低，此亦與其生長生理週期及其對應之澱粉含量有關。張誌仁等（2004）之竹材澱粉分析亦證實麻竹的澱粉含量在一年中最高時為桂竹的 6.5 倍，且又集中在 2~9 月，而桂竹則在 1~2 及 4~7 月間略為提高。故不同竹種的砍伐期亦應挑選，因此，本研究計畫第一年欲選用中部地區盛產之孟宗竹，分別於 11 月-3 月間與 5 月-9 月兩段不同之伐採季節進行竹材之伐採與製備，並評估其物理性質（密度、平衡含水率、吸水率、厚度膨脹率）、力學性質（抗彎強度、抗彎彈性模數、表面硬度）及耐生物劣化性（抗白蟻性、抗腐朽性）。另由於竹材維管束排列特性使竹材可視為功能性梯度材料，依取材位置可致性質具梯度變化，Huang *et al.*(2015)便指出維管束排列變化影響最直接性質為竹材密度，故計畫另以竹材密度作為評估基準，分析各種物理及力學性質。

本計畫第一年於兩季竹材之氣乾密度研究結果指出，冬季孟宗竹材氣乾密度次數分布接近常態分布，峰度 0.77 為正屬於高峽峰，表示常態峰內數量較多，本研究收集國產孟宗竹密度同質性較一般常態分布為高，偏度 -0.48 屬於負偏態分配，大部分密度偏右側（高密度），密度較低之試料佔少數，但低密度者密度值偏低，整體密度為 $518\text{-}984 \text{ kg/m}^3$ ，平均密度為 730 kg/m^3 ，每 25 kg/m^3 分配以 775-800 kg/m^3 區間次數最多。夏季孟宗竹材之氣乾密度亦接近常態分布，峰度 0.32 與冬季收集之國產孟宗竹密度性質相似屬於高峽峰，同質性較高，偏度 -0.14 與





冬季相似，屬於負偏態分配，大部分密度偏右側（高密度），密度較低之試材佔少數，低密度者密度值偏低，整體密度為 $402\text{-}932 \text{ kg/m}^3$ ，平均密度為 675 kg/m^3 ，每 25 kg/m^3 分配以 $700\text{-}725 \text{ kg/m}^3$ 區間次數最多，與冬季孟宗竹相比整體密度偏低，但分布趨勢與冬季竹材相似。本計畫選用國產孟宗竹密度差異偏大，但由於符合常態分布特性，因此未來利用上建議進行早期選材，優先剔除密度與性質較低者方可符合成本效益，此外，由於整體性質同質性較高，後續試驗可針對常態分布內機率分布較高族群 ($650\text{-}900 \text{ kg/m}^3$) 進行相關試驗以代表整體材料性質。

含水率方面，若將兩季節竹材氣乾密度以每 50 kg/m^3 進行等區間分類，其於相同密度區間之平均含水率顯示，密度低於 600 kg/m^3 以下為 16.48% (冬季) 及 16.92% (夏季)； $600\text{-}900 \text{ kg/m}^3$ 區間為 15.62-15.81% (冬季) 及 15.55-15.97% (夏季)； 900 kg/m^3 以上為 14.96% (冬季) 及 15.40% (夏季)，顯示兩伐採季節相同密度區間之竹材氣乾含水率相似。就不同密度區間而言，冬季孟宗竹平均之含水率於低氣乾密度 (600 kg/m^3 以下) 有偏高趨勢，而於高氣乾密度 (900 kg/m^3 以上) 有偏低趨勢，常態峰 ($600\text{-}900 \text{ kg/m}^3$) 內不同區間之氣乾密度平均含水率則較接近，夏季孟宗竹亦有相同趨勢。此外可發現兩季孟宗竹偏低氣乾密度區間之孟宗竹含水率於區間內母體資料離散程度較高，推測低密度下竹材性質變異較高，而高密度下竹材性質變異較低。

抗彎性質方面，兩伐採季節孟宗竹進行中央集中載重抗彎試驗後，依不同密度區分之平均抗彎強度 (MOR) 結果指出，冬季孟宗竹平均抗彎強度為 126.8-152.8 MPa；夏季孟宗竹平均抗彎強度為 111.3-164.5 MPa，隨氣乾密度增加平均抗彎強度有上升趨勢，Habibi *et al.* (2015) 報告指出單位面積維管束數量越多，則抗彎強度越高，係竹材主要組織為維管束組織及薄壁組織，維管束組織具有運輸水分及養分之木質部與韌皮部導管，以及主要作為支撐功能之厚壁纖維鞘 (Sclerenchyma)，即為竹材機械強度來源 (Lo *et al.*, 2004)。維管束組織本身空隙率較薄壁組織低，因此單位面積為管束數量多則密度較高，機械強度也隨之上升。另於抗彎彈係模數之分析中，由於竹材組織內以維管束組織之厚壁纖維鞘為





主要抗彎彈性來源，而維管束數量與竹材密度具相關性，因此密度越高則竹材抗彎彈性模數越高，本計畫依不同密度區分之平均抗彎彈性模數(MOE)結果顯示，冬季孟宗竹平均抗彎彈性模數為 10.6-12.3 GPa；而夏季孟宗竹平均抗彎彈性模數則為 10.4-12.0 GPa，兩伐採季節之竹材隨氣乾密度增加，平均抗彎彈性模數有稍微上升趨勢，但經單因子變異數分析顯示兩伐採季節不同密度之抗彎彈性模數並無顯著差異。

兩伐採季節孟宗竹材之抗白蟻試驗結果顯示，隨氣乾密度上升，白蟻食害質量損失率有下降趨勢，然由食害損失量之數值顯示低氣乾密度組($500-700 \text{ kg/m}^3$)為 184 mg (冬季)/203 mg (夏季)，高氣乾密度組($900-1000 \text{ kg/m}^3$)為 178 mg (冬季)/215 mg (夏季)，兩伐採季節蝕害質量相似，此係由於不同密度試驗材料於相同體積其質量不同，因此運算後損失率呈現倍率差異所致，此點由白蟻致死率可觀察出，隨氣乾密度上升，白蟻致死率無顯著變化，說明竹材密度對白蟻生活為非顯著之影響條件。然就兩伐採季節質量損失率結果顯示，冬季孟宗竹質量損失低於夏季孟宗竹，此結果與 Okahisa *et al.* (2006) 研究相似，冬季收穫之竹材於白蟻蝕害後質量損失較夏季為低。

兩伐採季節孟宗竹材經 60 天之耐腐朽性試驗結果顯示，4 種腐朽菌之耐腐朽性試驗中，隨竹材氣乾密度增加，質量損失率有下降趨勢，而質量損失量亦隨密度增加有下降趨勢，雖然不同密度試驗材料於相同體積其質量不同，運算後損失率呈現倍率差異，但損失量同樣隨密度增加減少。由於竹材氣乾密度與維管束比例有關，因此低密度竹材維管束比例較低而薄壁細胞比例較高，以致腐朽菌降解程度較高所致。4 菌株中質量損失以 *T. versicolor* 最高，與 Kim *et al.* (2010) 研究相似，木材腐朽菌中以 *T. versicolor* 降解竹材能力最高，此外兩伐採季節質量損失率結果顯示，冬季孟宗竹質量損失較高，此可能由於冬季孟宗竹澱粉含量較高所致。

接續前一年度之研究結果，為解決竹材之保存問題，近年來多國陸續發展環境友善之熱處理改質方式取代以往之化學保存藥劑法，然熱處理雖可有效提升竹





材之尺寸安定，避免其受水分影響而產生進一步之劣化（李志璇，2012），但處理後之竹材對白蟻之抵抗性仍未達標準之規範，且較高溫度之熱處理改質將使竹材之機械性能減低（黃國雄，2014）。過去有多篇報告指出木材以 PF 樹脂含浸後，製成之浸漬材 (Impreg) 可有效提升其尺寸安定性及強度表現，Gabrielli and Kamke (2010) 將混種楊木以加壓之方式注入 PF 樹脂，並施以熱壓製成之浸壓材 (Compreg)，可有效降低材料之厚度膨脹性，並提升其抗膨脹效能 (Anti-swelling efficient, ASE)。此外，亦有文獻顯示，將木材含浸 PF 樹脂並施以 50% 壓密率之熱壓製程後，其抗彎彈性模數及抗彎強度相較於未處理組提升近 60%，而抗壓強度及表面硬度則分別有 334% 與 266% 之提升 (Ang *et al.*, 2014)。另 Abdullah *et al.* (2013) 之試驗則指出相較於未處理材，以 PF 樹脂含浸處理之試材，其抗白蟻性與抗木蛀蟲性能有 59-88% 及 88-93% 之提升。故由上述之試驗可說明樹脂含浸或浸壓處理之改質法，可有效提升木質材料之各項性能表現。因此，本研究計畫擬參考浸壓材之處理方式並結合熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經不同溫度之蒸煮處理後，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其耐生物劣化之效能，希冀此類新型束狀竹層積材可作為一室內外均適用之新型建材選擇。





三、材料與方法

本研究計畫「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發」於本年度之研究重點旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫擬結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經不同溫度之熱處理後，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其耐生物劣化之效能。其重要工作項目與實施方法如次：

(一) 長束狀竹絲之準備

本年度之研究係使用 4 年生之孟宗竹 (*Phyllostachys edulis*, Moso bamboo) 為試驗材料，於伐採後將圓筒狀原竹對剖為半圓形，再將竹青部分之蠟質去除後，以輾壓機壓製成長束狀之竹絲。該長束狀竹絲再置於高壓蒸氣爐內進行 2 h 之蒸煮處理，蒸煮處理處理後，再進行高溫熱處理分別為 170°C 與 190°C，完成後乾燥保存備用。

(二) 束狀竹層積材之製程

將長束狀竹絲置於溫度 70°C 之烘箱中乾燥至含水率約 2% 後取出並浸漬於熱硬化型 PF 樹脂中，待 7 min 後取出，再次置於溫度 70°C 之烘箱中乾燥至含水率約 2% 後，取出置於成型模板內，並進行熱壓製程成型。熱壓溫度與壓力分別設定為 150°C 及 60 kgf/cm²，待壓至目標厚度 20 mm 後持壓 10 min。本研究共研製三種束狀竹層積材，分別為未處理之束狀竹層積材（編號：C）、中度熱處理（170°C）之束狀竹層積材（編號：M）與高度熱處理（190°C）之束狀竹層積材（編號：H），並與一般市面常見之竹側拼集成板材（編號：UV）及竹平接集成板材（編號：UH）進行物理、機械與抗生物劣化性之比較。

(三) 束狀竹層積材之物理性質試驗

1、含水率





將試材置於溫度 20°C ， 65% RH 之恆溫恆濕室中進行調濕處理約 3 週達平衡狀態後取出，依 CNS 452 木材含水率試驗法進行試材含水率之計算。

2、密度

依 CNS 451 木材密度試驗法進行量測。將調濕後達平衡狀態之試材測量其質量 (kg) 及體積 (m^3)，計算密度 (ρ)。

3、吸水率與吸水厚度膨脹率

將試材放置於 $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 烘箱達絕乾後，量測其質量與厚度，再將試材浸漬於 $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 之水下 25 mm 處，每隔 24 h 進行其重量與厚度變化之量測，至恆重為止。

（四）束狀竹層積材之機械性質試驗

1、抗彎試驗

依 CNS 454 木材抗彎強度試驗法，將調濕後達平衡狀態之試材量測各方向尺寸，跨距為試片厚度之 14 倍，載重速度為 5 mm/min ，計算試材之抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 與抗彎彈性模數 (Modulus of elasticity, MOE)。

2、硬度試驗

依 CNS 460 木材硬度試驗法，於載重方向與纖維方向垂直下，以一直徑 10 mm 之鋼球壓入竹材表面深度約 0.32 mm 處，平均壓入速度為 0.5 mm/min ，並計算其勃氏硬度 (H)。

（五）束狀竹層積材之抗生物劣化性評估

1、抗白蟻性試驗

依 CNS 15756 木材抗白蟻性試驗法進行室內試驗，供試白蟻採集自中興大學園內之台灣家白蟻。食害操作前，將試材置於 $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 之烘箱內乾燥 48 h ，並測定質量。食害操作時，於容器內均勻加入 20 g 去離子水，接著於建築用砂上放置一尺寸為 30 mm (長) \times 30 mm (寬) \times 1 mm (厚) 之塑膠網，再將試材





放置於塑膠網上，隨後置入台灣家白蟻之工蟻 150 隻、兵蟻 15 隻，共 165 隻白蟻，最後將飼育容器至於溫度 $28 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $80 \pm 5\%$ RH 之陰暗環境 21 天。食害操作結束後，以清水拭去試材表面殘餘之建築用砂與白蟻分泌物，於室內自然風乾 24 h 後將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥 48 h，並計算試材之質量減少率（Mass loss, ML）與白蟻死亡率（Termite mortality, TM）。

2、耐腐朽性試驗

依 CNS 6717 木材防腐劑之性能基準進行室內試驗。試驗菌株包含褐腐菌：硫色絢孔菌（*Laetiporus sulphureus*, LS）與白腐菌：樺褶孔菌（*Lenzites betulina*, LB）菌株皆購自台灣生物資源保存及研究中心。試驗使用直徑 95 mm，高度 70 mm 之玻璃廣口瓶為培養容器，於瓶中加入由 39 g 瓊脂（Agar）與 1L 蒸餾水混合而成之培養液 30 mL 後，經高溫高壓滅菌處理，於無菌之生物安全櫃中將試驗菌株移接至培養容器中，隨後將培養容器密封，並置於 25°C 、70%RH 以上之生長箱，待菌絲佈滿培養基表面後即可進行耐腐朽試驗。耐腐朽試驗前，將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥 48 h，並測定質量，腐朽試驗時於無菌之生物安全櫃內將經滅菌處理之試材每三塊一組，置於佈滿供試菌株之培養容器中，使其暴露於腐朽菌環境，接著將培養容器置於 25°C 、70%RH 以上之生長箱進行試驗，經 12 週後取出試材並以清水去除試材表面殘留之菌絲，於室內自然風乾 24 h 後將試材置於 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱內乾燥 48 h，測定試驗後之質量及補正試片之質量，並計算試材之質量減少率（Mass loss, ML）。





四、結果與討論

本研究計畫「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發(2/3)」於本年度之研究重點旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經蒸煮處理後再行熱處理製程，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其抗生物劣化之效能。

(一) 束狀竹層積材之物理性質分析

表 1 為本研究研製之三種常束狀竹層積材與一般試售常見之兩種竹集成板之密度與含水率比較，結果顯示，三組束狀竹層積材之密度係介於 1120-1230 kg/m³ 間，其中，以中度熱處理之束狀竹層積材 (M 組) 之密度最高。此外，三者之密度值均顯著高於一般市售之竹層積板材 (665-687 kg/m³)，統計結果亦顯示三組束狀竹層積材與兩組一般市售之竹層積板材間具明顯之密度值差異。另一方面，若與本研究團隊以往對戶外用材所進行之研究比較，三組束狀竹層積材之密度值均高於常見之巴杜柳桉 (*Shorea spp.*)、太平洋鐵木 (*Intsia spp.*)、紅膠木 (*Tristania spp.*)、乳桑木 (*Bagassa guianensis*)、風鈴木 (*Tabebuia spp.*) 等樹種 (趙偉成等 2016)。此趨勢間接說明長束狀竹層積有作為戶外用材之潛力。

再則，束狀竹層積材密度顯著較一般市售竹集成板高之原因，主要係由於其研製過程中經熱硬化型樹脂之含浸，並再透過熱壓機進行高緻密化之壓製與硬化成型，有效減少長束狀竹條彼此間堆疊間隙，與其細胞內之空腔比例 (Abdul Khalil *et al.*, 2014)。Ang *et al.* (2014) 之研究中曾以 PF 樹脂含浸血桐屬樹種後進行熱壓，製成之浸壓材 (Compreg wood) 之密度，由處理前之 288 kg/m³ 經處後提升至 543-688 kg/m³，密度值隨熱壓之壓力增加而上升。另對本研究所研製之三種束狀竹層積材之密度值進行組內比較可發現，三者之密度值並非隨熱處理條件增加而提高，反之，高度熱處理束狀竹層積材之密度值則有些許下降之趨勢，此現象說明高溫之熱處理條件會在處理過程中，使竹材之半纖維素等低分子量組





成分產生降解，進一步導致試材於處理時產生少量之質量損失，進而降低其成品之密度。郭瑋玲和盧崑宗（2012）針對國產柳杉（*Cryptomeria japonica*）與相思樹（*Acacia confusa*）進行不同溫度之熱處理時亦有相似之趨勢，其將前述兩樹種分別進行 130 °C、160 °C、190 °C、220 °C、250 °C、280 °C 等 6 種不同溫度條件之熱處理後，試驗結果顯示，柳杉之密度值由處理前之 438 kg/m³，逐漸降至 298 kg/m³ (280 °C)，而相思樹則密度由處理前之 804 kg/m³ 降至 747 kg/m³ (280 °C)。

由表 1 中亦可見三種束狀竹層積材與一般市售竹集成板之含水率試驗結果，結果顯示五組試材經調濕後取出所測得含水率係以高度熱處理之束狀竹層積材 (H 組) 為最低 (6.43%)，中度熱處理之束狀竹層積材 (M 組) 次之 (6.90%)，含水率最高者為一般市售之竹平接集成板 (UH 組)，為 9.44%。統計結果顯示，經過熱處理之兩組束狀竹層積材的含水率，與其餘三組間具顯著之差異存在。而經過熱處理之束狀竹層積材含水率顯著較一般市售竹集成板為低之原因，係由於熱處理之製程將使竹材中較低分子量的半纖維素產生熱降解，相對地，易與水分結合之羥基 (-OH) 也隨之減少（林曉洪和林盈宏，2011；Herrera *et al.*, 2014），以致有效降低熱處理束狀竹層積材之含水率。卓志隆和陳志昇（2014）曾利用國產杉木（*Cunninghamia lanceolata*）與桃花心木（*Swietenia macrophylla*）作為試材，分別進行處理溫度 170 °C、190 °C、210 °C、230 °C 與持溫時間 1h、2h、4h 及 8h 之熱處理改質，試驗結果顯示，兩樹種之含水率均隨處理溫度與持溫時間之增加，而有顯著下降之趨勢，其中，杉木由處理前之 13.2%，經 190 °C 持溫時間 2h 之熱處理後降至 5.7%；而桃花心木則由處理前之 13.5%，經 190 °C 持溫時間 2h 之熱處理後降至 4.8%。

表 2 為三組束狀之層積材與兩組一般市售竹集成板之吸水率與吸水厚度膨脹率試驗結果。首先由吸水率之試驗結果顯示，三種束狀竹層積材之吸水率平均介於 1.15%-1.59% 間，其中又以高度熱處理之束狀竹層積材 (H 組) 為最低，中度熱處理之束狀竹層積材 (M 組) 次之。而三組束狀竹層基材之吸水率均明顯較一般市售之竹集成板 (17.83%-23.11%) 為低。統計結果亦顯示三組束狀竹層積





材之吸水率與一般市售竹集成板間具顯著之差異。吸水厚度膨脹率方面，雖三組束狀竹層積材於浸水後之吸水厚度膨脹率與一般市售竹集成板間未有明顯之差距，然高度熱處理之束狀竹層積材（H 組）仍有最低之吸水厚度膨脹率，其吸水厚度膨脹率為 0.27%。

由前述之結果可發現，熱處理之製程可有效降低試材之吸水率與吸水厚度膨脹率，且隨熱處理條件之加劇，其成效也越為顯著，此原因與試材含水率會隨熱處理溫度之升高而有所降低相同，均與熱處理製程中，竹材之半纖維素等低分子量組成成分降解有關，隨熱處理條件之加劇，受降解之半纖維含量增加，同時易與水分結合之羥基則隨之減少（Kamperidou *et al.*, 2013；Yang *et al.*, 2016）。黃國雄等（2013）以國產麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*) 作為試材，將裁切之長方形麻竹試片分別進行處理溫度 160 °C、180 °C、200 °C、220 °C 與持溫時間 1h、2h、4h、8h 及 12h 之熱處理改質後，再含浸於水中兩週，取出量測其弦向與徑向之尺寸變化結果顯示，未處理麻之竹試片於兩週浸水試驗後，弦向與徑向之尺寸膨脹率為 9.17% 與 16.39%，而經處理溫度 220°C、持溫時間 2 小時之熱處理後，試片弦向與徑向之尺寸膨脹率則降至 7.96% 與 13.27%。此外，本研究除熱處理製程，亦將熱處理後之長束狀竹絲含浸於熱硬化型樹脂中，再行熱壓硬化後製成，此相似於浸壓材之製備方式，透過熱硬化型樹脂於硬化前與長束狀竹絲纖維素內剩餘羥基之反應，及硬化後填充細胞壁與細胞腔內之空隙等作用，有效阻絕水分與束狀竹層積材之結合，進而增進其尺寸安定性（Adawiah *et al.*, 2012；Ashaari and Bakar, 2010）。Gabrielli and Kamke (2010) 將雜交之楊木 (*Populus deltoides* and *trichocarpa*) 樹種含浸於熱硬化型 PF 樹脂後進行熱壓緻密化，並試材含浸於試溫水中 24 h，取出絕乾後再行 2 h 沸水之浸泡，量測之吸水厚度膨脹率結果顯示，未處理試材之吸水厚度膨脹率為 76.2%，而經熱硬化型樹脂浸壓處理者則降至 9.2%，具有近 88% 之減低效果。依據前述結果可說明，束狀竹層積材藉熱處理與浸壓處理兩偕同之製程，可有效降低試材與水分之結合，同時提升其尺寸安定性，相較於一般市售之竹集成板，更具備應用於戶外環境之之潛力。





(二) 束狀竹層積材之機械性質分析

表 3 為三組束狀竹層積材與 2 組市售竹集成板材之抗彎性質與表面硬度，結果顯示，經中度熱處理 (M 組) 與高度熱處理 (H 組) 之束狀竹層積材具較佳之抗彎彈性模數值 (Modulus of elasticity, MOE)，兩者分別為 10.72 GPa 及 10.60 GPa。其 MOE 值亦較市售之竹集成板為高。統計分析結果同樣顯示 M 組及 H 組束狀竹層積材之 MOE 值與 UV 及 UH 兩組市售竹層積材間具顯著之差異。而造成束狀竹層積材之 MOE 較佳之原因，係由於長束狀竹絲所含浸之 PF 樹脂會於熱壓成型階段積聚於試材表面，以致束狀竹層積材之上下兩側 (即壓縮側與引張側) 相對緻密，藉此提升其抗彎彈性模數 (Hartono *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2015)。過去亦有浸壓材之相關文獻具相似之試驗結果，Sharma *et al.* (2021) 將糖棕 (*Borassus flabellifer*) 試材含浸 PF 樹脂並進行緻密化處理，而後測定其 MOE 值顯示，相較於未處理之唐棕試材，其 MOE 由 3.88 GPa 上升至 5.18 GPa，提升近 34%。

而在抗彎強度 (Modulus of rupture, MOR) 方面，除高度熱處理組 (H 組) 外，未處理與中度熱處理束狀竹層積材之 MOR 值則與市售之竹集成板相近，其 MOR 值分別為 107.71 MPa 與 102.13 MPa。然由 MOR 值之試驗結果亦可發現，隨熱處理溫度之提升，束狀竹層積材之 MOR 值具下降之情況，此現象主要係由於越高溫度之熱處理條件，將增快材料非結晶區域內半纖維素受熱降解之速率，熱降解產生之有機酸類物質將進一步導致纖維素之酸水解反應，進而影響其機械性能 (Percin *et al.*, 2016)。上述現象與 Yang *et al.* (2016) 所進行之國產孟宗竹材 (*Phyllostachys pubescens*, Moso bamboo) 抗彎強度試驗之結果具相似之趨勢，結果顯示無論係以氮氣、空氣或以油為熱處理介質，以 210°C、4 hr 為熱處理條件之竹材其 MOR 值則較以 150°C、4 hr 热處理者降低 38%-39%。

另一方面，表 3 中亦顯示三組束狀竹層積材與兩組市售竹集成板之表面硬度值，結果顯示，各組試材之表面硬度值與其 MOE 值有相似之趨勢，均係以 M 組





(62.25 N) 與 H 組 (61.59 N) 具較佳之表面硬度值。此外，由統計分析之結果亦可說明各組束狀竹層積材之表面硬度值與市售竹集成板間存在顯著之差異。再則，造成兩種試材具顯著表面硬度值差異之原因，除前述提及束狀竹層積材於熱壓成型階段，材料表面會形成高緻密化之 PF 樹脂層外，填充於細胞壁與細胞腔內之熱硬化型 PF 樹脂，於硬化後形成之三次元網狀結構，將有效支撐細胞內外之空隙，減緩竹纖維於載重下之變形及饋陷 (Dungani *et al.*, 2014)。

(三) 束狀竹層積材之抗生物劣化性

表 4 為三組束狀竹層積材與兩組一般試售竹集成板之抗白蟻性，此外，為証實束狀竹層積材應用於戶外環境之可行性，另取柳杉邊材 (J-U 組) 與 K4 等級之 ACQ 保存處理柳杉邊材 (J-K4 組) 一併進行比較。結果顯示，經 21 日之實驗室級抗白蟻性試驗，三組束狀竹層積材之質量減少率平均介於 5.5%-6.3% 之間，質量減少率最低者為高度熱處理之束狀竹層積材 (H 組)，中度熱處理束狀竹層積材 (M 組) 次之 (5.9%)，三者之質量減少率結果雖較 K4 等級之 ACQ 保存處理柳杉邊材為高，且未達到中華民國國家標準 CNS 總號 15756 木材抗白蟻性試驗法中所規範之有效基準值 (質量減少率：3%以下)，然仍顯著低於一般市售之竹集成板材 (11.2%-15.0%) 與作為對照組之未處理柳杉邊材 (18.9%)，統計分析結果亦顯示三種束狀竹層積材於抗白蟻性試驗之質量減少率與 UV 及 UH 兩組竹集成板材間具顯著之差異存在。由於三組束狀竹層積材均經過含浸熱硬化型樹脂與熱壓硬化之製程，故高度緻密化之試材本體使白蟻較難以取食，此現象與現行戶外用材多選用密度高於 700 kg/m^3 之闊葉樹種具一定之關聯性。Bakar *et al.* (2013) 以 27 年生之油棕梠 (*Elaeis guineensis*) 作為試材，進行 PF 樹脂之含浸與熱壓硬化製程後進行實驗室級抗白蟻性試驗，試驗結果顯示，前述含浸與熱壓之製程可有效降低油棕梠受白蟻食害之可能，其質量損失率由未處理之 27.94% 顯著降至 9.58%，說明原本低密度之材料透過浸壓製成高度緻密化 (Densification) 之流程為提升材料生物耐久性之可行性方式。另一方面，在白蟻致死率之試驗結





果上，三組束狀竹層基材與一般市售之竹集成板間並未具顯著之差異，惟高度熱處理之束狀竹層積材（H 組）之白蟻致死率與 K4 等級之 ACQ 保存處理柳杉邊材（J-K4 組）測值接近。然統計分析結果則指出無論係對照組、束狀竹層積材抑或是一般市售之竹集成板材，七組材料於白蟻致死率間並無顯著之差異。

圖 1 顯示於 21 日抗白蟻性試驗後，未處理束狀竹層積材（C 組）、高度熱處理束狀竹層積材（H 組）與作為對照之柳杉邊材（J-U 組）與 K4 等級之 ACQ 保存處理柳杉邊材（J-K4 組）於 21 日實驗室級抗白蟻性試驗前後之白蟻食害成像，由於四者均有受白蟻食害之情形，故本研究參考 ASTM D3345-17 標準中木塊受白蟻食害後之評級方式，將試塊依其外觀受食害之嚴重程度分為 0-10 級。圖中可見作為空白組之柳杉邊材試塊（質量減少率 18.9%，高於中華民國國家標準 CNS 總號 15756 木材抗白蟻試驗法中所規範之試驗有效性基準值 15%），沿年輪走向之春材部分具大面積受白蟻食空之現象，故將其外觀受食害評級為 4 級（Heavy），而 K4 等級之 ACQ 保存處理柳杉邊材（J-K4 組）及未處理束狀竹層積材（C）、高度熱處理束狀竹層積材（H）三組試塊於 21 日之實驗室級抗白蟻性試驗後則僅有試塊邊緣受白蟻輕微食害，以致產生小型缺口及凹凸不平等現象，因此將此三者之外觀受食害評級為 9 級（Light attack）。

表 5 為各組束狀竹層積材與市售竹側拼集成板及竹平接集成板之耐腐朽性，另本研究團隊亦同時進行未處理柳杉邊材（J-U 組）與 K4 等級 ACQ 保存處理柳杉邊材（J-K4 組）之耐腐朽試驗，分別作為對照組及現行常見戶外用材之比較。試驗結果顯示，經 12 週褐腐菌 (*Laetiporus sulphureus*, LS) 之耐腐朽性試驗，三組束狀竹層機材中係以高度熱處理者（H 組）具有最低之質量減少率，其質量減少率為 4.6%，雖仍較 K4 等級 ACQ 保存處理柳杉邊材（1.6%）為高，然統計分析結果顯示與兩組市售竹集成板間具有顯著之差異存在。製程上，高度熱處理之束狀竹層基材由於具有緻密化（Densification）之樹脂外層包覆，故較一般竹材與未處理之木材不易受到腐朽菌之侵害 (Lee and Ashaari, 2015; Biziks *et al.*, 2021)，此外，其原料係以經熱處理改質之長束狀竹絲製成，極低之含水率與成品不易吸





濕之特性，將不利於腐朽菌之生長繁殖 (Candelier *et al.*, 2016 ; Gerardin, 2016)。而白腐菌 (*Lenzites betulina*, LB) 之耐腐朽試驗結果趨勢與褐腐菌相似，均係以 K4 級 ACQ 保存處理柳杉邊材 (J-K4 組) 具最低之質量減少率 (1.3%)，H 組 束狀竹層積材次之 (4.8%)，再次者為依序為 M 組 (7.6%)、C 組 (8.9%) 之試材，耐腐朽性最差者則為 UH 組之市售竹集成板 (33.6%)。此外，於表 5 中亦可發現竹材與木材對不同種類腐朽菌之耐受性具顯著之差別，舉例而言，於相同之試驗天數下，未處理柳杉邊材抵禦白腐菌侵害生長之能力顯著較褐腐菌為高，然以未處理竹片拼接而成之 UV 與 UH 兩組竹集成板則具截然相反之趨勢，造成此現象之原因係與兩者不同之組成分比例有關。

圖 2 為各組長束狀竹層積材、市售之竹集成板以及作為對照之未處理柳杉邊材與 K4 級 ACQ 保存處理柳杉邊材，經 12 週褐腐菌 (*Laetiporus sulphureus*, LS) 耐腐朽性試驗後的成像，由於各組試塊均受到程度不一之褐腐菌侵害，因此本研究參考 AWPA E14-16 標準將受褐腐菌侵害之試塊外觀進行 0-10 級之評級，藉以量化其個別受侵害之情況。圖中可見，試材外觀受侵害最嚴重者為未處理之柳杉邊材 (J-U 組)，其呈現嚴重之變形與內部潰陷之情況，由於受褐腐菌侵害之橫斷面面積已超過 60% 以上，故將其評級為 4 級 (Very severe attack)。而市售之竹側拼集成板 (UV 組) 於 12 週之褐腐菌耐腐朽性試驗後，已產生去木質化 (Delignification) 反應，出現分層剝離之現象，惟材料表面尚屬完整之情況故將其評級為 7 級 (Moderate/Severe attack)。另三組束狀竹層積材與 K4 級 ACQ 保存處理柳杉邊材試塊表面均無明顯受褐腐菌侵害之痕跡，未有空洞、剝離且保持完整，其質量之減少僅可能出現於試塊四周些許起毛與微鋸齒之現象，由於受腐朽之橫斷面面積低於 3% 以下，故評級為 9 級 (Tracesuspect)。圖 3 則為各組試材經 12 週白腐菌 (*Lenzites betulina*, LB) 耐腐朽性試驗後的表面成像，其呈現之趨勢與褐腐菌相似，均係未處理之柳杉邊材 (J-U 組) 與竹側拼集成板 (UV 組) 具較顯著之白腐菌危害，其中，前者之春材部分受白腐菌之侵害後呈現輕微海綿狀簍空之現象，而後者則出現中等面積之絲狀起毛與表層剝離位移之情況，





由於受侵害之面積達 30-50%間，故將兩者評級為 6 級 (Severe attack)。其餘 4 組試材表面保持完整，僅少部分之試塊邊緣具些微起毛及鋸齒之留存，受腐朽菌侵害之橫斷面面積均為 3%以下，故其外觀受腐朽侵害之評級為 9 級(Slight attack)。

五、結論

本研究計畫「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發(2/3)」於本年度之研究重點旨在解決竹材於應用上之耐久性問題，計畫結合浸壓材之處理方式與熱處理之製程，將輾碎之長束狀竹絲經蒸煮處理後再行熱處理製程，含浸熱硬化型 PF 樹脂，並以熱壓機台對其進行緻密化之壓製，製成新型之束狀竹層積材，並與現今市面上之竹側拼與平接集成板進行比較，評估其尺寸安定性與各項機械性能表現，探討其耐生物劣化之效能。

1. 完成長束狀竹絲之製備，並將不同處理條件之長束狀竹絲製成束狀竹層積材。本研究所研製三種束狀竹層積材，分別為未處理之束狀竹層積材（編號：C）、中度熱處理（170°C）之束狀竹層積材（編號：M）與高度熱處理（190°C）之束狀竹層積材（編號：H）。
2. 針對研製之三種束狀竹層積材與市售竹集成板之密度與含水率試驗結果顯示，三組束狀竹層積材之密度值係介於 1121-1231 kg/m³，顯著較一般常見之竹集成板材為高（665-668 kg/m³）。含水率則係以中度熱處理束狀竹層積材（M）與高度熱處理束狀竹層積材（H）兩組較低，分別為 6.90% 與 6.43%。
3. 吸水率與吸水厚度膨脹率之試驗結果顯示，束狀竹絲無論是否經過熱處理改質，製成之束狀竹層積材之吸水率與吸水厚度膨脹率均明顯較竹集成板材為低，且隨熱處理溫度之提升，三者之吸水率具減低之趨勢。
4. 機械性質方面，三組束狀竹層積材之抗彎強度將隨熱處理溫度之提升，而有減低之趨勢，然三者之抗彎彈性模數與表面硬度值則均較一般常見之竹集成板材為高，其中，又以中度熱處理束狀竹層積材（M）具有最佳之 MOE (10.72 GPa) 與表面硬度值 (62.25 N)。





5. 完成三種束狀竹層積材與兩種市售竹集成板之實驗室級 21 日抗白蟻性試驗，結果顯示，三組束狀竹層積材之質量減少率平均介於 5.5%-6.3% 之間，較一般常見之竹集成板材為低（11.2%-15.0%）。而白蟻致死率方面，經統計分析結果顯示 5 組試材並未有顯著之差異存在。

6. 12 週之耐腐朽性試驗中，除 ACQ 保存處理柳杉邊材外，高度熱處理束狀竹層積材對褐腐菌與白腐菌均具有最低之質量減少率（4.6%、4.8%），且其抗腐朽之能力相較於兩組市售竹集成板，則具有顯著之差異存在。

參考文獻

中華民國國家標準 CNS 451 (2013) 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 (2013) 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 454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。

中華民國國家標準 CNS 454 (2013) 木材硬度試驗法。經濟部標準檢驗局。

中華民國國家標準 CNS 6717 (2011) 木材防腐劑之性能基準。經濟部標準檢驗局。

中華民國國家標準 CNS 15756(2014)木材抗白蟻性試驗法。經濟部標準檢驗局。

王松永、周應松 (1990) 竹材複合嵌板之熱傳導率與靜曲特性，竹材綜合利用與加工。林產工業叢書。11:85—102。

王瀛生、陳載永 (1990) 竹材廢料製造粒片板、竹管蜂巢板及滾形粒片板，竹材綜合利用與加工。林產工業叢書。11:157—176。

台灣區合板工業同業公會 (2021) 台灣合板工業。台灣區合板同業公會。

呂錦明 (2010) 台灣竹圖鑑。晨星出版社。pp. 4。

李志璇 (2012) 三種熱處理介質對孟宗竹基本性質之影響。國立中興大學森林學系碩士學位論文。

卓志隆、陳志昇 (2014) 热處理對三種國產人工林木材力學性質之影響。林產工業。33(1)：1—12。





林曉洪、林盈宏（2011）熱處理木材之性質。林業研究季刊。33(1)：91-108。

邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬（2015）第4次全國森林資源調查成果概要。

台灣林業。41(4):3—13。

邱立文、黃群修、吳俊奇、謝小恬（2015）第4次全國森林資源調查成果概要。

台灣林業。41(4):3—13。

張誌仁、張豐吉、杜明宏（2004）伐採月份對麻竹及桂竹抗蟲性之影響。林產工業。23(2)：157—166。

郭瑋玲、盧崑宗（2012）不同溫度熱處理柳杉與相思樹木材之特性。林業研究季刊。34(4)：269—286。

黃國雄（2014）淺談熱處理竹材之基本性質。林業研究專訊。21(1):43—45。

趙偉成、鄭雅文、林育群、陳俞甯、楊德新（2016）九種戶外用材之物理力學性質及其抗生物劣化性評估。林業研究季刊。38(1)：21—31。

謝堂洲（1976）竹材之防腐、防蟲、防霉。林業叢刊 10。

Abdul Khalil, H. P. S., Dungani, R. Mohammed, I. A. Hossain, Md. S. Aprilia, N. S. Budiarto and E. Rosamah (2014) Determination of the combined effect of chemical modification and compression of agatis wood on the dimensional stability, termite resistance, and morphological structure. Bioresources. 9(4):6614-6626.

Abdullah, C. K., M. Jawaid, A. K. Shawkataly and N. F. M. Rawi (2013) Termite and borer resistance of oil palm wood treated with phenol formaldehyde resin. Journal of Industrial Research & Technology. 3(1):41-46.

Ang, A. F., A. Zaidon, E. S. Bakar, S. M. Hamami, U. M. K. Anwar and M. Jawaid (2014) Possibility of improving the properties of Mahang wood (*Macaranga* sp.) through phenolic compreg technique. Sains Malaysiana. 43(2):219-225.

Ashaari, Z., E. S. Bakar and P. M. Tahir (2010) Compreg Laminates From Low Density Tropical Hardwoods. In Proceedings of the International Convention of Society of





Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe–Timber Committee. 11-14.

ASTM International (2017) D3345-17 Standard test method for laboratory evaluation of solid wood for resistance to termites.

American Wood Protection Association (2016) E14-16 Standard method of evaluating wood preservatives in a soil bed.

Baker, E. S., J. Hao, Z. Ashaari and A. C. C. Yong (2013) Durability of phenolic-resin-treated oil palm wood against subterranean termites a white-rot fungus. International Biodeterioration & Biodegradation. 85:126-130.

Biziks, V., S. Bicke, G. Koch and H. Militz (2021) Effect of phenol-formaldehyde (PF) resin oligomer size on the decay resistance of beech wood. Holzforschung. 75(6):574-583.

Candelier, K., M. F. Thevenon, A. Petrisans, S. Dumarcay, P. Gerardin and M. Petrisans (2016) Annals of Forest Science. 73:571-583.

Dungani, R., M. N. Islam, H. A. Khalil, Y. Davoudpour and A. Rumidatul (2014) Modification of the inner part of the oil palm trunk (OPT) with oil palm shell (OPS) nanoparticles and phenol formaldehyde (PF) resin: Physical, mechanical, and thermal properties. BioResources. 9(1): 455-471.

Dong, Y. M., Y. T. Yan, K. L. Wang, J. Z. Li, S. F. Zhang, C. L. Xia, S. Q. Shi and L. P. Cai (2015) Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation. European Journal of Wood and Wood Products. 74(2):177-184..

Gabrielli, C. P. and F. A. Kamke (2010) Phenol-formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. Wood Science and Technology. 44:95-104.



- Gerardin, P. (2016) New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood-a review. *Annals of Forest Science*. 73:559-570.
- Habibi, M. K., A. T. Samaei, B. Gheshlaghi, J. Lu and Y. Lu (2015) Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: Underlying mechanisms. *Acta Biomaterialia* 16:178-168.
- Hartono, R., W. Hisayat, I. Wahyudi, F. Febrianto, W. Dwianto, J. H. Jang and N. H. Kim (2016) Effect of phenol formaldehyde impregnation on the physical and mechanical properties of soft-inner part of oil palm trunk. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*. 44(6): 842-851.
- Herrera, R., X. Erdocia, R. Llano-Ponte and J. Labidi (2014) Characterization of hydrothermally treated wood in relation to changes on its chemical composition and physical properties. *Journal of analytical and Applied Pyrolysis*. 107:256-266.
- Huang, P., W. S. Chang, M. P. Ansell, Y. J. Chew and A. Shea (2015) Density distribution profile for internodes and nodes of *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo) by computer tomography scanning. *Construction and Building Materials*. 93:197-204.
- Kamperidou, V., I. Barboutis and V. Vasileiou (2013). Response of colour and hygroscopic properties of Scots pine wood to thermal treatment. *Journal of forestry research*. 24(3):571-575.
- Kim, J. J., S. S. Lee, J. B. Ra, H. Lee, N. Huh and G. H. Kim (2011). Fungi associated with bamboo and their decay capabilities. *Holzforschung*. 65(2): 271-275.
- Lee, C. H., M. J. Chung, C. H. Lin and T. H. Yang (2012) Effect of layered structure on the physical and mechanical properties of laminated moso bamboo (*Phyllosachys edulis*) flooring. *Construction and Building Material*. 28:31-35.



- Lee, S. H. and Z. Ashaari (2015) Durability of phenolic-resin-treated sesenduk (*Endospermum diadenum*) and jelutong (*Dyera costulata*) wood against white rot fungus. European Journal of Wood and Wood Products. 73:553-555.
- Li, H. T., Q. S. Zhang, D. S. Huang and A. J. Deeks (2013) Compressive performance of laminated bamboo. Composites: Part B. 54:319-328.
- Liese, W. (1987) Research on bamboo. Wood Science and Technology. 21:189-209.
- Lo, T. Y., H. Z. Cui and H. C. Leung (2004) The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. Materials. Letters. 58:2595-2598.
- Luo, H., L. Yue, N. Wang, H. Zhang and X. Lu (2014) Manufacture of binferless fiberboard made from bamboo processing residues by steam explosion pretreatment. Wood Research. 59(5):861-870.
- Okahisa, Y., T. Yoshimura and Y. Imamura (2006) Seasonal and height-dependent fluctuation of starch and free glucose contents in moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its relation to attack by termites and decay fungi. Journal of Wood Science. 52(5):445-451.
- Percin, O., H. Peker and A. Atilgan (2016) The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis lipsky*) wood. Wood Research. 61(3):443-456.
- Qi, J. Q., J. L. Xle, X. Y. Huang, W. J. Yu and S. M. Chen (2014) Influence of characteristic inhomogeneity of bamboo culm on mechanical properties of bamboo plywood: effect of culm height. Journal of Wood Science. 60:396-402.
- Sharma, S. K. and B. U. Kelkar (2021) Effect of densification on certain physical and mechanical properties of inner soft wood of *Borassus flabellifer* L. Journal of the Indian Academy of Wood Science. 18(1):39-44.
- Sinha, A., D. Way and S. Mlasko (2014) Structural performance of glued laminated bamboo beams. Journal of Structural Engineering. 140(1):04013021.





- Sulastiningsih, I. M. and Nurwati (2009) Physical and mechanical properties of laminated bamboo board. *Journal of Tropical Forest Science*. 21:246-251.
- Sulthoni, A. (1985) Traditional preservation of bamboo in Java, Indonesia. In Recent Research on Bamboos. *Proceedings of the International Workshop*. pp. 349-358.
- Sun, B L., X. H. Wang and J. L. Liu (2013) Changes in dimentional stability and mechanical properties of *Eucalyptus pellita* by melamine-urea-formaldehyde resin impregnation and heat treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71:557-562.
- Yang, T. H., C. H. Lee, C. J. Lee and Y. W. Cheng (2016). Effects of different thermal modification media on physical and mechanical properties of moso bamboo. *Construction and Building Materials*. 119:251-259.





表 1、束狀竹層積材與竹集成板之密度與含水率

編號	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)
C	1120^b (77)	8.74^b (1.12)
M	1230^c (102)	6.90^a (0.23)b
H	1144^b (63)	6.43^a (0.51)
UV	665^a (19)	9.35^b (0.55)
UH	687^a (26)	9.44^b (0.22)





表 2、束狀竹層積材與竹集成板之吸水率與厚度膨脹率

編號	吸水率 (%)	吸水厚度膨脹率 (%)
C	1.59^a (0.83)	0.47^{ab} (0.23)
M	1.25^a (0.65)	0.51^b (0.18)
H	1.15^a (0.59)	0.27^a (0.10)
UV	23.11^c (3.71)	0.48^{ab} (0.23)
UH	17.83^b (2.44)	0.67^b (0.12)





表 3、束狀竹層積材與竹集成板之機械性質

編號	MOE (GPa)	MOR (MPa)	表面硬度 (N)
C	9.17^{ab} (1.57)	107.71^b (15.93)	54.13^b (19.77)
M	10.72^b (1.14)	102.13^b (13.40)	62.25^b (17.58)
H	10.60^b (2.25)	86.19^a (16.28)	61.59^b (20.56)
UV	7.13^a (0.59)	96.17^b (5.97)	19.23^a (4.32)
UH	8.15^a (0.82)	99.95^b (8.15)	22.15^a (6.72)





表 4、各組試材於抗白蟻試驗後之質量減少率與白蟻致死率

編號	質量減少率 (%)	白蟻致死率 (%)
C	6.3^b (0.4)	24.3^{ab} (1.8)
M	5.9^b (0.5)	27.1^{ab} (1.7)
H	5.5^b (0.1)	30.2^b (3.8)
UV	15.0^d (0.7)	19.8^a (5.3)
UH	11.2^c (0.3)	26.0^{ab} (4.2)
J-K4	1.6^a (0.2)	35.3^b (5.0)
J-U	18.9^d (1.3)	18.0^a (1.8)



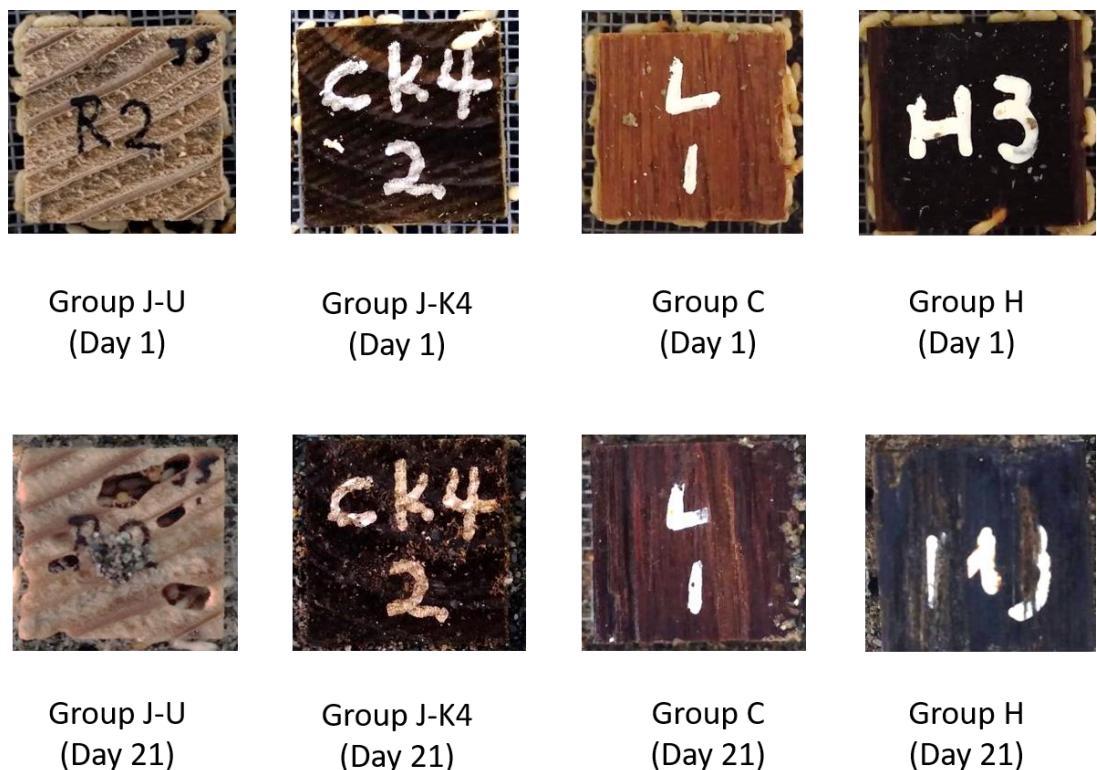


圖 1、各組試材於抗白蟻試驗中之試材外觀成像





表 5、各組試材於耐腐朽試驗後之質量減少率

編號	<i>Laetiporus sulphureus</i>	<i>Lenzites betulina</i>
	LS 質量減少率 (%)	LB 質量減少率 (%)
C	6.6^{bc} (0.3)	8.9^b (1.7)
M	5.8^{bc} (0.7)	7.6^b (0.9)
H	4.6^{ab} (0.3)	4.8^{ab} (0.2)
UV	8.7^c (1.2)	25.7^d (1.9)
UH	8.6^c (0.7)	33.6^e (4.8)
J-U	30.6^d (0.2)	18.9^c (5.0)
J-K4	1.6^a (0.9)	1.3^a (0.2)





Group UV



Group J-U



Group J-K4



Group C



Group M



Group H

圖 2、各組試材於 12 週褐腐菌耐腐朽試驗後之表面成像。





Group UV



Group J-U



Group J-K4



Group C



Group M



Group H

圖 3、各組試材於 12 週白腐菌耐腐朽試驗後之表面成像。





圖表附錄：

表 1、束狀竹層積材與竹集成板之密度與含水率

編號	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)
C	1120^b (77)	8.74^b (1.12)
M	1230^c (102)	6.90^a (0.23)b
H	1144^b (63)	6.43^a (0.51)
UV	665^a (19)	9.35^b (0.55)
UH	687^a (26)	9.44^b (0.22)





表 2、束狀竹層積材與竹集成板之吸水率與厚度膨脹率

編號	吸水率 (%)	吸水厚度膨脹率 (%)
C	1.59^a (0.83)	0.47^{ab} (0.23)
M	1.25^a (0.65)	0.51^b (0.18)
H	1.15^a (0.59)	0.27^a (0.10)
UV	23.11^c (3.71)	0.48^{ab} (0.23)
UH	17.83^b (2.44)	0.67^b (0.12)





表 3、束狀竹層積材與竹集成板之機械性質

編號	MOE (GPa)	MOR (MPa)	表面硬度 (N)
C	9.17^{ab} (1.57)	107.71^b (15.93)	54.13^b (19.77)
M	10.72^b (1.14)	102.13^b (13.40)	62.25^b (17.58)
H	10.60^b (2.25)	86.19^a (16.28)	61.59^b (20.56)
UV	7.13^a (0.59)	96.17^b (5.97)	19.23^a (4.32)
UH	8.15^a (0.82)	99.95^b (8.15)	22.15^a (6.72)





表 4、各組試材於抗白蟻試驗後之質量減少率與白蟻致死率

編號	質量減少率 (%)	白蟻致死率 (%)
C	6.3^b (0.4)	24.3^{ab} (1.8)
M	5.9^b (0.5)	27.1^{ab} (1.7)
H	5.5^b (0.1)	30.2^b (3.8)
UV	15.0^d (0.7)	19.8^a (5.3)
UH	11.2^c (0.3)	26.0^{ab} (4.2)
J-K4	1.6^a (0.2)	35.3^b (5.0)
J-U	18.9^d (1.3)	18.0^a (1.8)



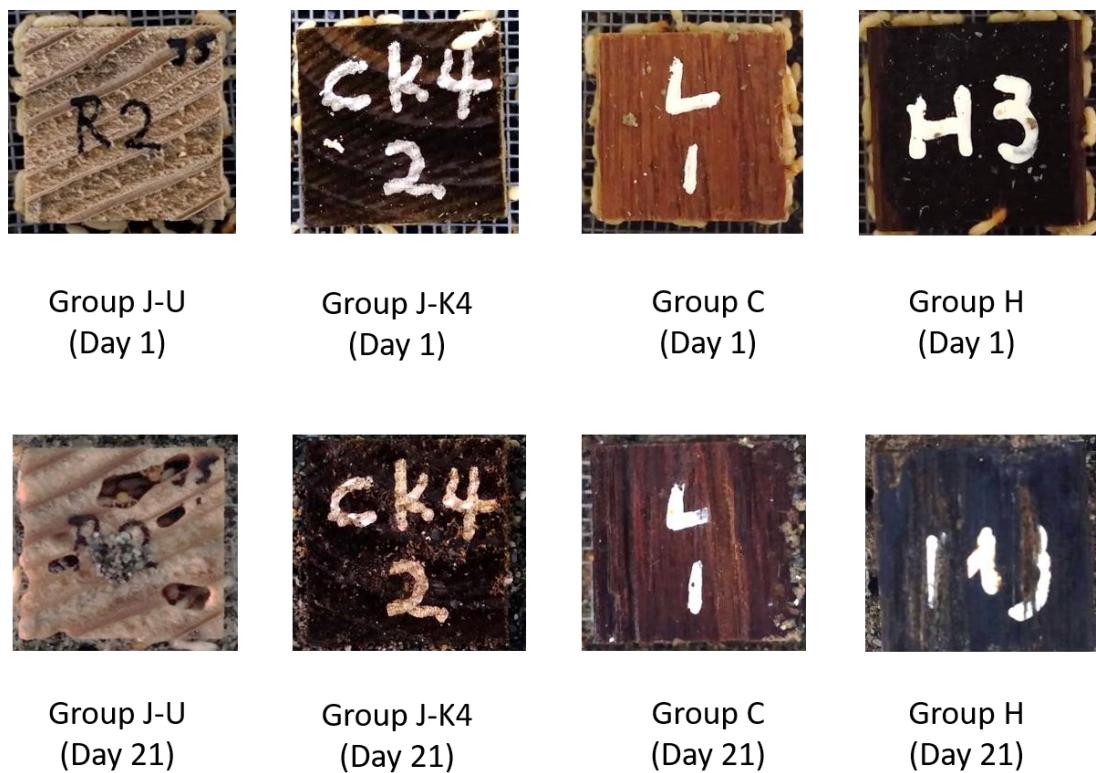


圖 1、各組試材於抗白蟻試驗中之試材外觀成像





表 5、各組試材於耐腐朽試驗後之質量減少率

編號	<i>Laetiporus sulphureus</i>	<i>Lenzites betulina</i>
	LS 質量減少率 (%)	LB 質量減少率 (%)
C	6.6^{bc} (0.3)	8.9^b (1.7)
M	5.8^{bc} (0.7)	7.6^b (0.9)
H	4.6^{ab} (0.3)	4.8^{ab} (0.2)
UV	8.7^c (1.2)	25.7^d (1.9)
UH	8.6^c (0.7)	33.6^e (4.8)
J-U	30.6^d (0.2)	18.9^c (5.0)
J-K4	1.6^a (0.9)	1.3^a (0.2)





Group UV



Group J-U



Group J-K4



Group C



Group M



Group H

圖 2、各組試材於 12 週褐腐菌耐腐朽試驗後之表面成像。





Group UV



Group J-U



Group J-K4



Group C



Group M



Group H

圖 3、各組試材於 12 週白腐菌耐腐朽試驗後之表面成像。

