



公開  
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e202

## 農業部林業及自然保育署112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 (3/3) (第1年/全程1年)**  
(英文名稱) **The bonding technology and optimized process of Bamboo-bundle Laminated Lumber as the engineering bamboo (3/3)**

計畫編號：**112農科-7.4.4-務-e2(2)**

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

計畫主持人：**楊德新**  
研究人員：**趙偉成、鄭雅文、蘇韋錚、高志翔**  
執行機關：**國立中興大學**



1123079



## 一、執行成果中文摘要：

竹材為一種富含發展潛力之可再生性綠色資材。其優勢包括生長快速、收穫期短及高拉伸強度等特性，為現今重要之森林非木材產品。而竹材亦具有廣泛且不同之應用範疇，現今於各竹材性質之研究已臻成熟下，國內外已有多種竹層積複合材等各式結構用材之研發，如竹纖維板、竹合板、竹粒片板及以側拼或平接方式製成之竹集成板類。本研究將原竹管輾漬為長束狀竹絲後，透過高壓蒸煮、乾燥、含浸、重組排列、冷壓、熱壓成型(熱硬化)等步驟製成新型束狀竹層積材(Bamboo scrimber, BS)，利用長束狀竹條進行不同溫度之熱處理改質，建立最適化之熱處理束狀竹層積材製程，並於前兩年已完成基礎性質與抗生物劣化之探討。於本年度(112)目標旨於工程竹材之研製與其接合方式之探討，將最適化之束狀竹層積材經分級後作為工程竹材之集成元，並評估合適之膠合劑種類與膠合性質(煮沸剝離試驗、膠合剪斷試驗、抗彎性質試驗等)，以建置最佳之加工作業製程。在縱向接合品質評估，藉由探討不同加壓壓力與表面粗糙處理對於集成材膠合性質之影響，擇一最適化者作為集成材之生產製程。研究成果顯示，束狀竹層積材製備而使之指接集成元及集成材，其抗彎性能、膠合強度與耐久性，均可符合CNS 11031 (2014)之性能基準，此結果顯示本計畫建置生產製程尚可解決熱處理與高密度木竹材膠合性質不佳等加工疑慮，並提供建築設計產業一新型之建材選擇，亦可提升竹產業產品之多元性與附加價值，發展具市場潛力之綠色工程竹材。

## 二、執行成果英文摘要：

Bamboo is a renewable green material which has many advantages, including with fast growing, short harvesting period, and high tensile strength. Currently, it is an important non-wood forest product, which has multiple and wide applications. Nowadays, various types of bamboo-based composites, bamboo fiberboard, bamboo plywood, bamboo particleboard and bamboo glued-laminated lumber, have been developed. In this study, Bamboo scrimber (BS) in a novel type bamboo-based composite that is made from bamboo strip or bamboo bundle. The main production processes of BS included splitting, high pressure steam treatment, drying, dipping, assembly, cold-pressing and heat curing or hot-pressing, using long bundles of bamboo strips for heat treatment modification at different temperatures, establishing an optimal heat-treated bundle-shaped bamboo laminated lumber process, and completed the discussion on basic properties and anti-biological degradation in the past two years. The goal of this year (112) is to discuss the research and development of engineering bamboo and its bonding method, classify the optimal Bamboo scrimber as an integrated element of engineering bamboo, and evaluate the suitable adhesive type and bonding properties (boiling Peeling test, gluing shear test, bending property test, etc.) to establish the best processing procedure. In the evaluation of joint quality, by exploring the effects of different pressing pressures and surface roughness treatments on the glued properties of glulam, choose the most optimal one as the production process of glued laminated timber (Glulam). The results show that the bending properties, adhesive bonding strength and adhesive weather resistance of both finger-joint laminas and glulam made by BS corresponded to the standard value according to CNS 11031 (2014). Those results can solve processing concerns such as heat treatment and poor bonding properties of high-density wood and bamboo by the manufacturing process investigated in this research, and provide a





new type of building material selection for the architectural design industry. It can also enhance the diversity and added value of bamboo industry products, and develop green projects with market potential.

### 三、計畫目的：

#### 一、110年度目標

1、前年度目標旨於探究不同伐採季節對竹材各項性質之影響，計畫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）。

2、本年度之研究成果，供作次年度束狀竹層積之原料選擇，以提升製程效率與製品之良率，並建置國產竹材於不同伐採季節之性質基礎資訊。

#### 二、111年度目標

1、盼解決竹材於應用上之保存問題，計畫擬結合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，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。

2、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。

#### 三、112年目標

1、旨於工程竹材之研製與其接合方式之探討，希望藉由最適化分級，將束狀竹層積材作為工程竹材之集成元，進一步製備成集成材並評估合適之膠合劑種類與膠合性質（煮沸剝離試驗、膠合剪斷試驗、抗彎性質試驗等），以建置最佳之加工作業製程。

2、本年度（112）研發成果，可解決熱處理與高密度木竹材膠合性質不佳等加工疑慮，並提供建築設計產業一新型之建材選擇，亦可提升竹產業產品之多元性與附加價值，發展具市場潛力之綠色工程竹材。

### 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旨在工程竹材之研製與其接合方式之探討，將束狀竹層積材作為工程竹材之集成元，進一步製備成集成材並評估其各項性質（煮沸剝離試驗、膠合剪斷試驗、抗彎性質試驗等）。

#### （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 pubescens*, Moso bamboo），取用原竹伐採後於工廠經剖竹機將圓筒狀原竹剖成竹片，並經修整後所產生之長束狀竹絲作為試驗材料。該長束狀竹絲置於高壓蒸氣爐內進行2 h之蒸煮處理後，再進行170°C高溫熱處理，完成後保存備用。

#### （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（固形分70-78%）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/cm<sup>2</sup>，待壓至目標厚度後持壓10 min，以完成束狀竹層積材之製程。





### （三）束狀竹層積材集成元之機械等級區分與製備

#### 1. 束狀竹層積材之機械等級區分

束狀竹層積材裁製為20 mm（厚度）×100 mm（寬度）×850 mm（長度）之集成元，根據CNS 11031（2014）結構用集成材標準進行抗彎B試驗，並依測定抗彎彈性模數進行機械等級區分，如表1所示，以作為後續製備指接集成元之參考依據。

#### 2. 束狀竹層積材集成元之製備

將束狀竹層積材利用指榫成型機將其端部進行切削加工，其中，指榫之設定依據CNS 11031（2014）結構用集成材標準中針對於長度方向膠合部之品質要求，指接之斜面傾斜比應為1/7.5以下，並參考國內在生產結構用集成材領域上，具有正字標記之德豐木業股份有限公司之建議，依其在生產製程上常使用之指榫參數，指榫長度為21 mm，指距為5 mm，換算之指接斜面傾斜比為1/8.4，接合用膠合劑選用國家標準中建議之間苯二酚-酚甲醛共縮合樹脂

（Resorcinol-phenol formaldehyde resin, RPF），佈膠量為250~350 g/m<sup>2</sup>，壓力為40 kgf/cm之條件進行長度方向接合部之膠合作業。此外，為評估用於束狀竹層積材集成元之最適化指接型態，本案參考國內業者常用之兩種指榫設計，如圖1所示，包含指榫先端完全密合者（緊密型式，C-type）及先端留有空隙者（間隙型式，G-type），共計兩種。

根據束狀竹層積材之機械等級區分結果，將相同機械等級者依上述指接條件進行長度方向之接合，再經表面修整後完成指接集成元之製備。在指接集成元長度方向接合部之抗彎性能方面，依照中華民國國家標準CNS 11031（2014）結構用集成材之抗彎C試驗，將上述各指接類型之集成元試片於長度方向接合部位處試材中央之條件下，設定跨距為試材厚度25倍，並以三分等載重模式進行抗彎性質之測定，以評估最適化之指接型態。

#### （四）束狀竹層積材集成材之強度性能設計與製備

根據指接集成元之機械等級分布，依CNS 11031（2014）所規範之層積方向上集成元品質規定進行配置，強度性能設計時，參考王松永與卓志隆（1985）研究中之抗彎彈性模數預測模型，以不考慮膠合層對整體剛性貢獻之前提，根據各層集成元之彈性模數配置預測集成材之抗彎彈性模數，本案針對束狀竹層積材與熱處理束狀竹層積材之條件各進行兩種等級之同等級集成材強度設計，並根據各集成材所得之預測彈性模數，其在CNS 11031（2014）同等級集成材之抗彎性能基準（表2）中所對應之強度等級進行組別區分，例如集成材預測彈性模數為9.5 GPa以上，未滿10.5 GPa者，歸類為E95-F315級之集成材設計。

在集成材製備方面，將束狀竹層積材集成元依照強度設計排序各層順序，在佈膠作業前，會依序進行膠合面修整、粗糙度處理及之清潔作業，隨後方可進行集成作業。佈膠方式係採單面佈膠（圖2），膠合劑使用間苯二酚-酚甲醛共縮合樹脂（RPF），佈膠量為250 g/m<sup>2</sup>，膠合方式採冷壓膠合（圖3），加壓條件為10 kgf/cm<sup>2</sup>。

#### （五）束狀竹層積材集成材之性質測定

束狀竹層積材集成材製備完畢後，會進行為期5週之養護過程，再根據中華民國國家標準CNS 11031（2014）進行集成材之抗彎A試驗、浸水剝離試驗、煮沸剝離試驗、膠合剪力試驗、甲醛釋出量試驗，並評估各強度配置下之集成材是否符合CNS11031（2014）之性能基準要求。

## 五、結果與討論：

### （一）束狀竹層積材指接集成元之抗彎性能評估

在熱處理束狀竹層積材之部分，本案使用經170°C熱處理之長束狀竹絲所製成的熱處理束狀竹層積材，在長度方向接合部（指接）之集成元試片製備方面，考量到若兩端指榫在完美契合之狀態下，可能存在指榫斜面所受壓力不足之風險，故將指榫設計為指榫先端留有空隙者（間隙型式，G-type），以確保各膠合斜面之加壓壓力充足，惟此設計型態亦尚有指端處局部壓力過大引發接合處破壞之風險，故同時保有指榫先端完全密合者（緊密型式，C-type）之條件，以評估應用在束狀竹層積材集成元生產上之最適化指接型態。





熱處理束狀竹層積材之指接集成元經抗彎C試驗後所得之結果如表3所示，C-type組內L140級集成元之MOE及MOR分別為14.8 GPa及101.5 MPa，L125級集成元之MOE及MOR分別為13.2 GPa及97.2 MPa；G-type組內之L140級集成元之MOE及MOR分別為14.6 GPa及101.0 MPa，L125級集成元之MOE及MOR分別為13.0 GPa及97.7 MPa。為判定各條件之指接強度性能是否符合CNS 11031 (2014) 標準所要求之抗彎性能品質（表1），各等級集成元之MOR依照下式1計算抗彎強度在75%信賴水準下之95%下限值（特徵值），得C-type組之L140級與L125集成元的抗彎強度下限值分別為93.1 MPa與85.3 MPa；G-type組之L140級與L125集成元的抗彎強度下限值分別為62.4 MPa與66.0 MPa，各組條件均可符合對應等級之抗彎性能要求（表1）。若進一步評估逐個試片之MOR符合對應等級之抗彎強度平均值之比率，亦可發現全數之試片均可在標準規範平均值之上。

$$5\text{th percentile value} = \text{Mean} - K \times S.D \quad (1)$$

另一方面，圖4顯示束狀竹層積材經抗彎試驗破壞後，試片破壞型態之外觀狀況，其中a型破壞型態主要發生於指接處以外之部位，係為最理想之長度方向接合品質，表示指接處強度大於束狀竹層積材本身之強度。b型及c型破壞型態主要發生在引張側之指榫斷裂，表示膠合劑本身之強度及其與束狀竹層積材間之介面強度均較指榫處強度高，亦屬膠合性能佳之表現。惟d型破壞型態則為指榫間直接發生相互脫離之現象，且指榫保持健全狀態，此現象顯示膠合劑本身之強度或其與束狀竹層積材間之介面強度較指榫處強度低，代表試片可能存在膠合劑滲透度不足，或膠合劑本身硬化不完全之潛在疑慮。

各條件之試片，其各種破壞型態所佔比例如表3所示，發現以C-type表現出較佳之長度方向接合部品質，其中有18%屬於a型破壞型態，b型及c型破壞型態分別佔46%與36%，全數試片均未發生指榫分離之現象（d型）；G-type則未觀察到a型破壞型態，b型、c型與d型破壞型態分別佔50%、42%、8%。上述結果指出，即使C-type或G-type之全數試片均可符合CNS 11031 (2014) 標準所要求之集成元抗彎強度性能要求，但G-type組表現出具有更大之膠合性能欠佳的潛在風險，故綜合上述結果，用於本案期末進度之集成材製備及性能分析之研究所使用之集成元，將全數使用緊密型式之指榫型態設計作為加工使用參數。

## （二）束狀竹層積材集成元之機械等級區分與集成材製備

使用170°C長束狀竹絲所製作而成之束狀竹層積材集成元，根據CNS 11031 (2014) 標準進行抗彎B試驗後，再依照集成元之強度性能基準（表1）區分各集成元之機械等級，結果如圖5所示，供本批次製備集成材之束狀竹層積材集成元的抗彎彈性模數平均值為10.6 GPa，熱處理束狀竹層積材集成元之抗彎彈性模數平均值為12.2 GPa，其中束狀竹層積材以L100與L110等級者佔主要比例，分別為34.7%與38.8%；熱處理束狀竹層積材以L110與L125等級者佔主要比例，分別為48.8%與34.1%，基於此結果，後續之集成材之強度設計係利用該三種機械等級之集成元進行。

在集成材之抗彎彈性模數預測方面，本研究係引用王松永與卓志隆（1985）研究中所提出之抗彎剛性預測模型進行預測。集成材之抗彎剛性（Flexural stiffness, EpreI）可透過構成集成材要素之各層集成元之彎曲剛性總和而求得，惟膠合層之厚度過小，對於集成材斷面整體之剛性貢獻低，故在本研究中忽略膠合層造成之影響。該預測模型僅適用於同等級與對稱異等級集成材，本試驗之集成材層數為五層，如圖6所示，將各層集成元之抗彎剛性代入預測模型公式中，並經公式展開及簡化後，即可得五層集成材之抗彎彈性模數預測值（Epre）公式。

本案設計之集成材為五層同等級集成材，配置原則是以集成元等級對於層積方向之中心軸作為對稱軸，並將抗彎彈性模數較大者作為外層用集成元使用，較小者則作為中間層或內層集成元使用，並盡可能以組內抗彎彈性模數預測值（Epre）變異性最低為前提進行設計。最終所設計之各組Epre如表4所示，在束狀竹層積材集成材方面，配置為L100構成與L110構成之五層同等級集成材，Epre之平均值分別為10.7 GPa、11.8 GPa；在熱處理束狀竹層積材集成材方面，配置為L110構成與L125構成之五層同等級集成材，Epre之平均值分別為12.1 GPa、13.6 GPa。



### （三）束狀竹層積材集成材強度性能設計與抗彎性質

集成材依照CNS 11031 (11031) 標準進行抗彎試驗後，所得之抗彎試驗結果，依式(1) 計算各組集成材之MOE與MOR 5%下限值。試驗結果(表4)顯示，束狀竹層積材之L100及L110構成者之MOE實測值的平均值分別為11.0 GPa及11.7 GPa，MOE實測值之5%下限值分別為9.7 GPa及10.5 GPa，MOR平均值分別為105.0 MPa及111.9 MPa，MOR之5%下限值為91.5 MPa及95.1 MPa；熱處理束狀竹層積材之L110及L125構成者之MOE實測值的平均值分別為12.5 GPa及13.8 GPa，MOE實測值之5%下限值分別為11.6 GPa及12.4 GPa，MOR平均值分別為90.3 MPa及98.4 MPa，MOR之5%下限值為67.4 MPa及85.5 MPa。

在MOE方面，束狀竹層積材(L100構成、L110構成)及熱處理束狀竹層積材(L110構成、L125構成)之預測值( $E_{pre}$ )與實測值間的差異百分率分別為3.6%、0.8%、3.3%、1.5%，各組呈現之差異均甚低，此結果說明，若在集成材進行集成作業前，引用抗彎彈性模數模型可準確且有效率地生產預期強度性能之束狀竹層積材集成材，並對於降低產品機械性能變異性方面具有顯著助益，顯示國產竹材用於開發工程竹材之可行性。

在MOR方面，同樣為L110同等級構成之設計下，可見熱處理束狀竹層積材相較於束狀竹層積材，MOR有下降之趨勢。在Percin等(2016)過去之研究中指出，越高溫度之熱處理條件，將增加材料非結晶區域內半纖維素熱降解之速率，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。本案去年度(111年)之研究結果中亦指出，以170°C熱處理之束狀竹層積材，其MOE與MOR相較於未經熱處理者，分別有些微上升及下降之趨勢，與本年度之集成元機械等級區分及集成材抗彎試驗結果有相似之趨勢。

此外，熱處理束狀竹層積材相較於未經熱處理者，對於MOE值有不變或提高之趨勢，MOR值則有衰減之趨勢，此現象反應在機械等級區分材及集成材強度設計上時，存在相同剛性設計下，承載能力較弱之風險。惟根據CNS 11031 (11031) 標準中集成材之抗彎性能基準要求(表2)，本案製備之束狀竹層積材L100構成者、L110構成者、熱處理束狀竹層積材L110構成者、L125構成者分別可符合E105-F345級、E105-F345級、E120-F375級、E135-F405級集成材之抗彎性能基準要求。綜合上述結果，指出雖然熱處理材導致集成材MOR有降低之風險存在，但各條件組仍可表現與設計等級相符之強度性能。

另一方面，各條件組之集成材破壞型態如圖7所示，無論在束狀竹層積材條件組、或是熱處理束狀竹層積材條件組中，均未出現膠合層間之剝離現象(圖7a、圖7c)，束狀竹層積材集成材組，破壞均發生於引張側之纖維拉伸斷裂(圖7b)，而熱處理束狀竹層積材集成材組，則均為發生於引張側呈現脆性斷裂(圖7d)，上述結果可初步判定即使熱處理條件組仍有良好之膠合性能，惟熱處理致使材料轉變為脆性之特性，建議作為結構用途之安全性能考量方面，尚需近一部研究檢視其風險程度，或針對引張側進行補強以增進其延展性。

### （四）束狀竹層積材集成材之膠合性能與甲醛釋出量

束狀竹層積材集成材經抗彎試驗後，選取破壞後試體之健全部位裁切為膠合剪斷試驗，浸水剝離試驗、煮沸剝離試驗及甲醛釋出量試驗之試片，並進行對應試驗。膠合剪斷試驗之結果如表5所示，束狀竹層積材集成材L100與L110構成組之膠合剪斷強度平均值為12.7 MPa與12.0 MPa、木破率均為80%；熱處理束狀竹層積材集成材L110與L125構成組之膠合剪斷強度平均值為9.9 MPa與10.1 MPa、木破率為80%與70%。上述結果可發現，熱處理將造成束狀竹層積材之膠合剪斷強度下降，但對於木破率之影響較小，顯示較溫和之處理條件(170°C)仍降低長束狀竹絲對於膠合劑之親和性，濕潤與滲透性降低造成彼此間之膠合性能衰減。然而，本案依據去年度(111年)之束狀竹層積材基礎性質建置結果，判定與CNS 11031 (2014) 標準中硬槭木、樺木、山毛櫟、櫟木、油仔木(樹種區分編號1類)之力學性能相似，其對應之膠合剪斷強度及木破率基準值分別為9.6 MPa與60%，本案所生產之束狀竹層積材集成材，無論未經熱處理及經170°C熱處理者，其膠合性能均尚可符合其要求。





而在膠合層之耐候性與甲醛釋出量方面，浸水剝離、煮沸剝離及甲醛釋出量試驗之結果如表6所示，束狀竹層積材集成材L100與L110構成組之浸水剝離試驗剝離率之平均值分別為0.8%與0.0%，煮沸剝離試驗剝離率之平均值分別為2.6%與0.0%；熱處理束狀竹層積材集成材L110與L125構成組之浸水剝離試驗剝離率之平均值均為4.9%，煮沸剝離試驗剝離率之平均值分別為4.2%與4.0%。上述結果指出使用本計畫建議之層積方向膠合製程參數，所生產之束狀竹層積材集成材，無論為未經熱處理及經170°C熱處理者，其膠合層之耐候性平均表現均可符合CNS 11031 (2014) 標準之要求（剝離率在5%以內），可應用於CNS 11031 (2014) 標準中所規範之I類使用環境，惟若考量組內變異性，熱處理 (170°C) 條件組尚有部分之試片之剝離率超過規範之基準值 (5%)，顯示未來以熱處理束狀竹層積材所生產之集成材，若欲應用於戶外之極端氣候場域時，尚存在耐候性之風險，建議應配合其他表面處理措施，避免膠合層直接暴露於高濕度之大氣或土壤，以延長產品生命週期或保障構件安全性。另一方面，各條件組之甲醛釋出量平均值與最大值均為<0.1 mg/L，可符合CNS 11031 (2014) 標準中F1 等級之品質（平均值為0.3 mg/L以下、最大值為0.4 mg/L以下）。

## 六、結論：

本計畫以三年為期進行「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發（3/3）」，本年度（112年）之研究重點旨在將束狀竹層積材作為竹工程用竹材之集成元，並透過指接效率研究，達成束狀竹層積材縱向指接之應用，並進一步製備集成材探討束狀竹層積材集成材之各項性質，以作為未來設計端設計施工、與相關材料選擇時之參考依據。截至期末進度為止，本計畫已完成之成果如次：

- 1、完成束狀竹層積材指接集成元之抗彎性能測試，試驗結果顯示C-type具有最佳之MOR及MOR下限值，由從破壞型態亦指出C-type具有最佳之長度方向接合部品質，故集成材係使用此指榫設計之集成元進行製備。
- 2、完成集成元之機械等級區分、指接加工作業，根據集成元機械等級區分之結果指出，束狀竹層積材集成元之機械等級以L100與L110佔主要比例（34.7%、38.8%）；熱處理束狀竹集成元之機械等級則以L110與L125佔主要比例（48.8%、34.1%）。
- 3、完成束狀竹層積材之集成材強度設計及製備，本案依據上述機械等級分佈結果，設計束狀竹層積材L100、L110構成之同等級集成材與熱處理束狀竹層積材L110、L125構成之同等級集成材，共計4種配置型式。
- 4、完成集成材之性質分析試驗，試驗結果指出，無論束狀竹層積材或熱處理束狀竹層積材集成材，其抗彎性能均達到與設計等級相符之抗彎性能，在膠合剪斷強度與剝離試驗結果評估方面，亦均可符合標準所要求之膠合性能與耐久性，惟熱處理束狀竹層積材集成材在同樣之剛性設計下，其承載能力有較低之趨勢，亦有較脆性及膠合強度、耐久性衰減之虞，其作為戶外之結構用途時，建議輔以補強或其他表面處理措施，以增進產品之生命週期及構件安全性。

## 七、參考文獻：

- 中華民國國家標準CNS451 (2013) 木材密度試驗法。經濟部標準檢驗局。  
中華民國國家標準CNS452 (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CNS453 (2013) 木材抗壓試驗法。經濟部標準檢驗局。  
中華民國國家標準CNS454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。  
中華民國國家標準CNS455 (2013) 木材平行纖維方向剪力強度試驗法。經濟部標準檢驗局。  
中華民國國家標準CNS459 (2012) 木材尺度收縮率試驗法。經濟部標準檢驗局。





- 中華民國國家標準CNS460 (2013) 木材硬度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準CNS11031 (2014) 結構用集成材。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。
- 李佳如、林蘭東、林志憲、楊德新 (2016) 柳杉集成元之配置對結構用集成材抗彎性質之影響。林產工業。35(1):11 - 20。
- 李佳如、張峯榕、林志憲、楊德新 (2014) 35年生國產柳杉分等結構用材之機械性質評估。林產工業。33 (2) : 61 - 70。
- 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。
- 卓志隆、顏廷諭、洪崇彬 (2010) 柳杉疏伐木製造之集成材抗彎性質評估。林產工業。29 (4) : 227 - 236。
- 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。
- 郭瑋玲、盧崑宗 (2012) 不同溫度熱處理柳杉與東狀竹層積材木材之特性。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。
- 楊德新 (2007) 中小徑木製造構造用集成材及其工程性能之研究。國立臺灣大學森林環境暨資源學系博士論文。
- 葉民權、李文雄、林玉麗 (2006) 國產柳杉造林木開發結構用集成材之研究。台灣林業科學。21 (4) : 531 - 546。
- 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。
- 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.
- Boonstra, M. J., J. V. Acker, B. F. Tjeerdsma, E. V. Kegel (2007) Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. Ann. For. Sci. 64(7):679-690.
- Candelier, K., M. F. Thevenon, A. Petrissans, S. Dumarcay, P. Gerardin and M. Petrissans (2016) Annals of Forest Science. 73:571 - 583.
- 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.



- 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.
- 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 (*Phyllostachys edulis*) flooring. *Construction and Building Material*. 28:31 - 35.
- 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.
- Obataya, E., P. Kitin and H. Yamauchi (2007) Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber - foam composite structure. *Wood Sci. Technol.* 41:385 - 400.
- 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.
- Sinha, A., D. Way and S. Mlasko (2014) Structural performance of glued laminated bamboo beams. *Journal of Structural Engineering*. 140(1):04013021.
- 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、等級區分機區分集成元之強度性能基準 (CNS 11031, 2014)

| 依機械區分<br>之等級 | MOE<br>( GPa ) | MOR ( MPa ) |                  | 抗拉強度 ( MPa ) |      |
|--------------|----------------|-------------|------------------|--------------|------|
|              |                | 平均值         | 下限值 <sup>1</sup> | 平均值          | 下限值  |
| L200         | 20.0           | 81.0        | 61.0             | 48.0         | 36.0 |
| L180         | 18.0           | 72.0        | 54.0             | 42.5         | 32.0 |
| L160         | 16.0           | 63.0        | 47.5             | 37.5         | 28.0 |
| L140         | 14.0           | 54.0        | 40.5             | 32.0         | 24.0 |
| L125         | 12.5           | 48.5        | 36.5             | 28.5         | 21.5 |
| L110         | 11.0           | 45.0        | 34.0             | 26.5         | 20.0 |
| L100         | 10.0           | 42.0        | 31.5             | 24.5         | 18.5 |
| L90          | 9.0            | 39.0        | 29.5             | 23.5         | 17.5 |
| L80          | 8.0            | 36.0        | 27.0             | 21.5         | 16.0 |
| L70          | 7.0            | 33.0        | 25.0             | 20.0         | 15.0 |
| L60          | 6.0            | 30.0        | 22.5             | 18.0         | 13.5 |
| L50          | 5.0            | 27.0        | 20.5             | 16.5         | 12.0 |
| L40          | 4.0            | 24.0        | 18.0             | 14.5         | 10.5 |
| L30          | 3.0            | 21.0        | 16.0             | 12.5         | 9.5  |

<sup>1</sup> 每批量集成元經 CNS 11031 (2014) 標準規定取樣後，95%以上之強度下限值應符合對應等級之強度下限值欄位之數值。



表 2、同等級集成材之抗彎性能基準 (CNS 11031, 2014)

| 層積數                  | 強度等級      | 抗彎彈性模數(GPa) |      | 抗彎強度下限<br>值 |
|----------------------|-----------|-------------|------|-------------|
|                      |           | 平均值         | 下限值  |             |
| 同等級<br>集成材<br>(4層以上) | E190-F615 | 19.0        | 16.0 | 61.5        |
|                      | E170-F540 | 17.0        | 14.0 | 54.0        |
|                      | E150-F465 | 15.0        | 12.5 | 46.5        |
|                      | E135-F405 | 13.5        | 11.5 | 40.5        |
|                      | E120-F375 | 12.0        | 10.0 | 37.5        |
|                      | E105-F345 | 10.5        | 9.0  | 34.5        |
|                      | E95-F315  | 9.5         | 8.0  | 31.5        |
|                      | E85-F300  | 8.5         | 7.0  | 30.0        |
|                      | E75-F270  | 7.5         | 6.5  | 27.0        |
|                      | E65-F255  | 6.5         | 5.5  | 25.5        |
|                      | E55-F225  | 5.5         | 4.5  | 22.5        |

表 3、束狀竹層積材指接集成元經抗彎 C 試驗後所得之抗彎性質結果

| 條件               | 機械等級 | MOE<br>(GPa)               | MOR ( MPa)      |      | 合格率<br>(%)       | 破壞型態 <sup>3</sup> |
|------------------|------|----------------------------|-----------------|------|------------------|-------------------|
|                  |      |                            | 平均值             | 下限值  |                  |                   |
| 緊密型式<br>(C-type) | L140 | 14.8<br>(0.2) <sup>1</sup> | 101.5<br>(3.4)  | 93.1 | 100 <sup>2</sup> | a 18%, b 46%,     |
|                  | L125 | 13.2<br>(0.5)              | 97.2<br>(5.1)   | 85.3 | 100              | c 36%, d 0%       |
| 間隙型式<br>(G-type) | L140 | 14.6<br>(0.4)              | 101.0<br>(15.0) | 62.4 | 100              | a 0%, b 50%,      |
|                  | L125 | 13.0<br>(0.3)              | 97.7<br>(13.2)  | 66.0 | 100              | c 42%, d 8%       |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差

<sup>2</sup> 試片合格之判定，係判斷各別試片之抗彎強度是否符合其抗彎彈性模數所對應機械等級之抗彎強度平均值。合格率則指合格試片數量占該條件組總數之百分率。

<sup>3</sup> a、b、c、d 四種破壞型態外觀分別如圖 4 所示，百分比係指發生該種破壞型態之試片數量佔該條件組總數之百分率。



表 4、束狀竹層積材同等級集成材經抗彎 A 試驗後所得之抗彎性質結果

| 條件                | $E_{pre}$<br>( GPa ) | MOE ( GPa )                  |                 | MOR ( MPa ) |                  |
|-------------------|----------------------|------------------------------|-----------------|-------------|------------------|
|                   |                      | 平均值                          | 5%下限值           | 平均值         | 5%下限值            |
| 束狀竹<br>層積材        | L100 構成              | 10.7<br>( 0.1 ) <sup>1</sup> | 11.0<br>( 0.4 ) | 9.7         | 105.0<br>( 4.3 ) |
|                   | L110 構成              | 11.8<br>( 0.1 )              | 11.7<br>( 0.4 ) | 10.5        | 111.9<br>( 5.3 ) |
| 熱處理<br>束狀竹<br>層積材 | L110 構成              | 12.1<br>( 0.0 )              | 12.5<br>( 0.3 ) | 11.6        | 90.3<br>( 7.3 )  |
|                   | L125 構成              | 13.6<br>( 0.1 )              | 13.8<br>( 0.4 ) | 12.4        | 98.4<br>( 4.1 )  |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差

表 5、束狀竹層積材集成材各層積方向膠合條件之膠合剪力試驗結果

| 條件            | 強度等級    | 膠合剪斷強度 ( MPa )            | 木破率 ( % ) |
|---------------|---------|---------------------------|-----------|
| 束狀竹層積材        | L100 構成 | 12.7 ( 2.9 ) <sup>1</sup> | 80 ( 30 ) |
|               | L110 構成 | 12.0 ( 2.3 )              | 80 ( 30 ) |
| 熱處理<br>束狀竹層積材 | L110 構成 | 9.9 ( 1.4 )               | 80 ( 20 ) |
|               | L125 構成 | 10.1 ( 3.0 )              | 70 ( 30 ) |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差

表 6、束狀竹層積材集成材浸水剝離、煮沸剝離與甲醛釋出量試驗結果

| 條件                | 強度等級    | 膠合層剝離率 ( % )             |             | 甲醛釋出量 ( mg/L ) |      |
|-------------------|---------|--------------------------|-------------|----------------|------|
|                   |         | 浸水剝離試驗                   | 煮沸剝離試驗      | 平均值            | 最大值  |
| 束狀竹<br>層積材        | L100 構成 | 0.8 ( 1.1 ) <sup>1</sup> | 2.6 ( 0.6 ) | <0.1           | <0.1 |
|                   | L110 構成 | 0.0 ( 0.0 )              | 0.0 ( 0.0 ) | <0.1           | <0.1 |
| 熱處理<br>束狀竹<br>層積材 | L110 構成 | 4.9 ( 2.3 )              | 4.2 ( 0.8 ) | <0.1           | <0.1 |
|                   | L125 構成 | 4.9 ( 2.7 )              | 4.0 ( 2.9 ) | <0.1           | <0.1 |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差



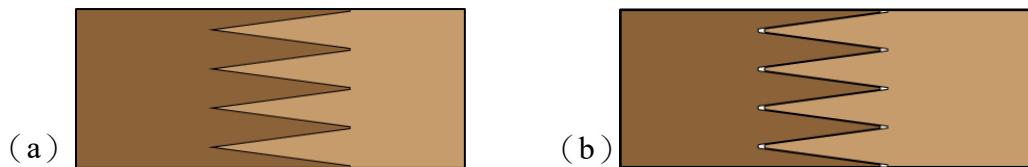


圖 1、本計畫之束狀竹層積材指接集成元指接型態設計。(a) 先端完全密合者 (緊密型式, C-type); (b) 先端留有空隙者 (間隙型式, G-type)。



圖 2、束狀竹層積材集成元之佈膠作業。



圖 3、束狀竹層積材集成材之層積方向冷壓作業。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4、指接集成元之破壞型態。(a) 破壞於指接處以外之部位；(b) 破壞於指接處及指接處以外之部位；(c) 破壞於指接處，引張側指榫斷裂；(d) 破壞於指接處，引張側指榫鬆脫而未發生斷裂現象。



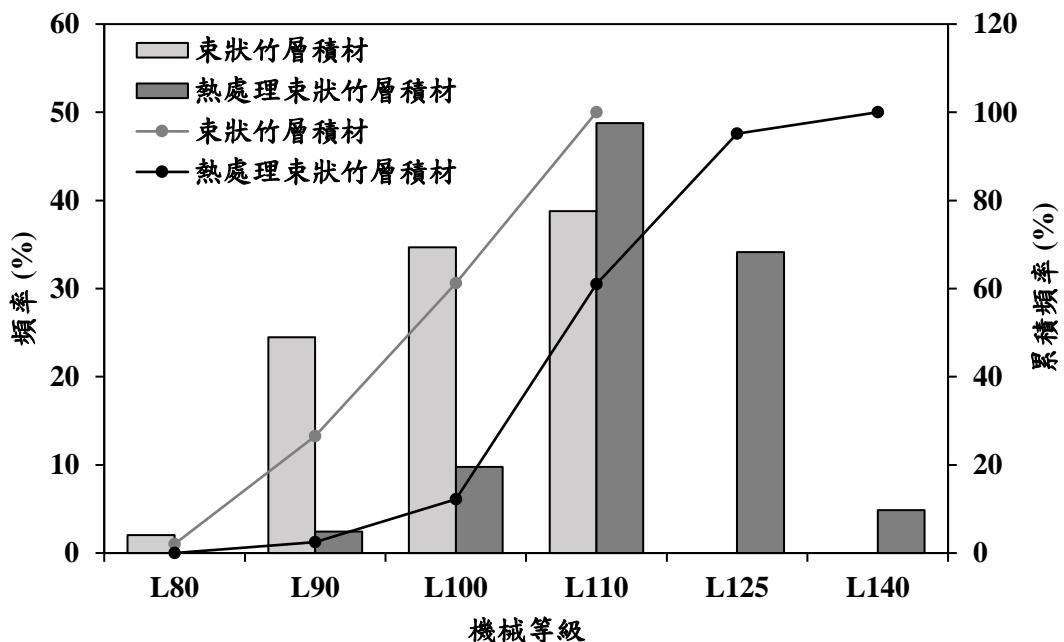


圖 5、束狀竹層積材集成元之機械等級分布。

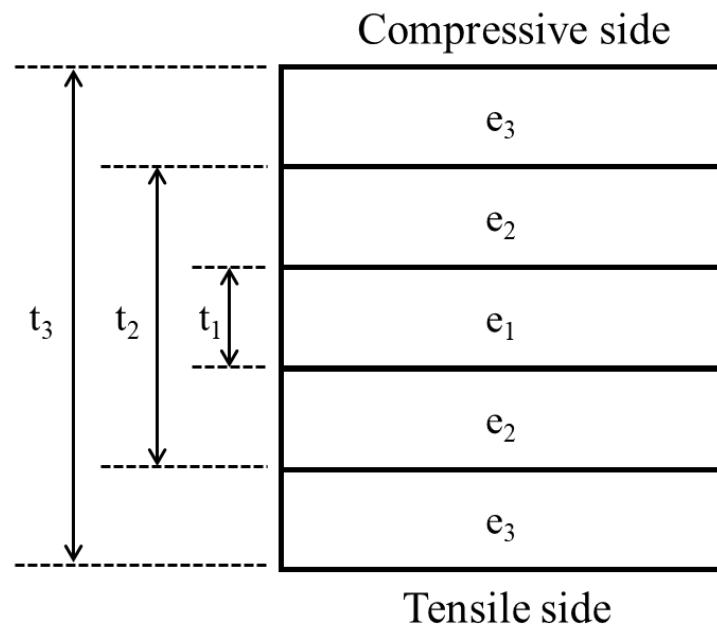


圖 6、五層集成材之層積方向剖面圖與代號參數。



圖 7、束狀竹層積材集成材之破壞型態。(a) 束狀竹層積材集成材層間破壞於材料，未出現層間剝離現象；(b) 束狀竹層積材集成材引張側破壞呈現纖維撕裂狀；(c) 热處理束狀竹層積材集成材層間破壞於材料，未出現層間剝離現象；(d) 热處理束狀竹層積材集成材引張側發生脆性破壞。





## 參考文獻

- 中華民國國家標準 CNS451 (2013) 木材密度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS452 (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 CNS453 (2013) 木材抗壓試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS455 (2013) 木材平行纖維方向剪力強度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS459(2012)木材尺度收縮率試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS460 (2013) 木材硬度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS11031 (2014) 結構用集成材。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。
- 李佳如、林蘭東、林志憲、楊德新 (2016) 柳杉集成元之配置對結構用集成材抗彎性質之影響。林產工業。35(1):11 - 20。
- 李佳如、張峯榕、林志憲、楊德新 (2014) 35 年生國產柳杉分等結構用材之機械性質評估。林產工業。33 (2): 61 - 70。
- 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。
- 卓志隆、顏廷諭、洪崇彬 (2010) 柳杉疏伐木製造之集成材抗彎性質評估。林產工業。29 (4): 227 - 236。





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。

郭瑋玲、盧崑宗（2012）不同溫度熱處理柳杉與束狀竹層積材木材之特性。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。

楊德新（2007）中小徑木製造構造用集成材及其工程性能之研究。國立臺灣大學

森林環境暨資源學系博士論文。

葉民權、李文雄、林玉麗（2006）國產柳杉造林木開發結構用集成材之研究。台灣林業科學。21 (4): 531 - 546。

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。

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.

Boonstra, M. J., J. V. Acker, B. F. Tjeerdsma, E. V. Kegel (2007) Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. Ann. For. Sci. 64(7):679-690.

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

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.



- 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.
- 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.
- 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.
- Obataya, E., P. Kitin and H. Yamauchi (2007) Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber - foam composite structure. *Wood Sci. Technol.* 41:385 - 400.
- 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.

Sinha, A., D. Way and S. Mlasko (2014) Structural performance of glued laminated bamboo beams. Journal of Structural Engineering. 140(1):04013021.

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.





# 農業部林業及自然保育署主管一般科技計畫

## 112年度細部計畫研究報告

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 (3/3)

(英文名稱) The bonding technology and optimized process of  
Bamboo-bundle Laminated Lumber as the engineering bamboo (3/3)

計畫編號： 112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： 112年1月1日 至 112年12月31日

計畫主持人： 楊德新

執行機關： 國立中興大學





## 【摘要】

竹材為一種富含發展潛力之可再生性綠色資材。其優勢包括生長快速、收穫期短及高拉伸強度等特性，為現今重要之森林非木材產品。而竹材亦具有廣泛且不同之應用範疇，現今於各竹材性質之研究已臻成熟下，國內外已有多種竹層積複合材等各式結構用材之研發，如竹纖維板、竹合板、竹粒片板及以側拼或平接方式製成之竹集成板類。本研究將原竹管輾潰為長束狀竹絲後，透過高壓蒸煮、乾燥、含浸、重組排列、冷壓、熱壓成型（熱硬化）等步驟製成新型束狀竹層積材（Bamboo scrimber, BS），利用長束狀竹條進行不同溫度之熱處理改質，建立最適化之熱處理束狀竹層積材製程，並於前兩年已完成基礎性質與抗生物劣化之探討。於本年度（112）目標旨於工程竹材之研製與其接合方式之探討，將最適化之束狀竹層積材經分級後作為工程竹材之集成元，並評估合適之膠合劑種類與膠合性質（煮沸剝離試驗、膠合剪斷試驗、抗彎性質試驗等），以建置最佳之加工業製程。在縱向接合品質評估，藉由探討不同加壓壓力與表面粗糙處理對於集成材膠合性質之影響，擇一最適化者作為集成材之生產製程。

研究成果顯示，束狀竹層積材製備而成之指接集成元及集成材，其抗彎性能、膠合強度與耐久性，均可符合 CNS 11031 (2014) 之性能基準，此結果顯示本計畫建置生產製程尚可解決熱處理與高密度木竹材膠合性質不佳等加工疑慮，並提供建築設計產業一新型之建材選擇，亦可提升竹產業產品之多元性與附加價值，發展具市場潛力之綠色工程竹材。



## [Abstract]

Bamboo is a renewable green material which has many advantages, including with fast growing, short harvesting period, and high tensile strength. Currently, it is an important non-wood forest product, which has multiple and wide applications. Nowadays, various types of bamboo-based composites, bamboo fiberboard, bamboo plywood, bamboo particleboard and bamboo glued-laminated lumber, have been developed. In this study, Bamboo scrimber (BS) in a novel type bamboo-based composite that is made from bamboo strip or bamboo bundle. The main production processes of BS included splitting, high pressure steam treatment, drying, dipping, assembly, cold-pressing and heat curing or hot-pressing, using long bundles of bamboo strips for heat treatment modification at different temperatures, establishing an optimal heat-treated bundle-shaped bamboo laminated lumber process, and completed the discussion on basic properties and anti-biological degradation in the past two years. The goal of this year (112) is to discuss the research and development of engineering bamboo and its bonding method, classify the optimal Bamboo scrimber as an integrated element of engineering bamboo, and evaluate the suitable adhesive type and bonding properties (boiling Peeling test, gluing shear test, bending property test, etc.) to establish the best processing procedure. In the evaluation of joint quality, by exploring the effects of different pressing pressures and surface roughness treatments on the glued properties of glulam, choose the most optimal one as the production process of glued laminated timber (Glulam).

The results show that the bending properties, adhesive bonding strength and adhesive weather resistance of both finger-joint laminas and glulam made by BS corresponded to the standard value according to CNS 11031 (2014). Those results can solve processing concerns such as heat treatment and poor bonding properties of high-density wood and bamboo by the manufacturing process investigated in this research, and provide a new type of building material selection for the architectural design industry. It can also enhance the diversity and added value of bamboo industry products, and develop green projects with market potential.





## 一、前言

近年來，全球氣候變遷，各地異常氣候與災害發生頻率倍增，日益惡化的環境污染、全球溫化以及災害浩劫不斷的在世界各地發生，以至全球各國莫不審慎以對，目前國際上有許多重要會議與政策，我國也於 2021 年 3 月正式公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，並於同年 4 月時宣示將正式啟動，其提及之十二項關鍵戰略項目中，以第九項「自然碳匯」及第十項「淨零綠生活」與林產業最具關聯性，林務局亦配合淨零路徑藍圖，提出 3 大重點策略，包含「增加森林面積」、「加強森林經營」、「提升國產材利用」。此外，針對於產品或服務之碳足跡（Carbon footprint label）與碳排放標籤（Carbon emission label）制度概念也作為應對碳排議題之策略，逐漸為各國陸續採用與發展，碳標籤不僅可清楚提供產品在整個生命週期中產生之碳排總量資訊，亦可藉由強化產品本身商業形象之利基，吸引業者參與相關制度，並盼最終形成自主尋求與建構減低碳商業模式之良性循環，創造綠色產業鏈。

其中竹子屬於生態建材，具有減少能源消耗的功能和降低對有限資源的依賴、進而開發新資源增加效益，且低人工處理，在生命週期的廢棄再生階段，可經由收集、處理而轉變為原物料或產品、易於再生或者是延長原有物件之使用年限，以減少廢棄物。在台灣因位於熱帶與亞熱帶之交替地區，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，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。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)；利用面上，竹材之彈性模數及相對曲率(Relative curvature) 亦優於木材 (Obataya *et al.*, 2007) 說明除了方便、環保等優勢外，竹材做為結構用材於荷載能力方面之潛力亦不可忽視。



## 二、前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要）

本計畫第一年（110 年）於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  $518 - 984 \text{ kg/m}^3$ ，平均密度為  $730 \text{ kg/m}^3$ ，每  $25 \text{ kg/m}^3$  分配以  $775 - 800 \text{ kg/m}^3$  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  $402 - 932 \text{ kg/m}^3$ ，平均密度為  $675 \text{ kg/m}^3$ ，每  $25 \text{ kg/m}^3$  分配以  $700 - 725 \text{ kg/m}^3$  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（ $650 - 900 \text{ kg/m}^3$ ）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  $50 \text{ kg/m}^3$  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  $600 \text{ kg/m}^3$  以下為 16.48%（冬季）及 16.92%（夏季）； $600 - 900 \text{ kg/m}^3$  區間為 15.62 - 15.81%（冬季）及 15.55 - 15.97%（夏季）； $900 \text{ kg/m}^3$  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（ $600 \text{ kg/m}^3$  以下）有偏高趨勢，而於高氣乾密度（ $900 \text{ kg/m}^3$  以上）有偏低趨勢，常態峰（ $600 - 900 \text{ kg/m}^3$ ）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。另於抗彎彈性模數之分析中，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 kg/m<sup>3</sup>) 為 184 mg (冬季) / 203 mg (夏季)，高氣乾密度組 (900 - 1000 kg/m<sup>3</sup>) 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 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。

第二年 (111 年) 之研究旨在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 (Antiswelling 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，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。本研究團隊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)、170°C 热處理之束狀竹層積材 (編號：M) 與 190°C 热處理之束狀竹層積材 (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。

基礎物理性質研究結果顯示，發現束狀竹層積材與一般市售常見之兩種竹集成板之密度與含水率比較，以 170°C 热處理之束狀竹層積材（M 組）之密度最高，三者之密度值均顯著高於一般市售之竹層積板材（ $665 - 687 \text{ kg/m}^3$ ）；若與戶外用材所進行比較，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.）等樹種（趙偉成等，2016），間接說明長束狀竹層積有作為戶外用材之潛力。

抗彎性質與表面硬度研究結果顯示，經 170°C 热處理（M 組）與 190°C 热處理（H 組）之束狀竹層積材具較佳之抗彎彈性模數值（Modulus of elasticity, MOE），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。而造成此現象之原因，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 MOE (Hartono *et al.*, 2016 ; Dong *et al.*, 2015)。MOR 的部分，未處理與 170°C 热處理之 MOR 值則與市售之竹集成板相近。MOR 值之試驗結果發現，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)。為証實束狀竹層積材應用於戶外環境之可行性，進一步對生物劣化性進行探討，抗白蟻性試驗結果顯示，三組束狀竹層積材質量減少率最低者為 190°C 热處理（H 組），170°C 热處理（M 組）次之（5.9%），均未達到 CNS 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），且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%），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  $700 \text{ kg/m}^3$  之闊





葉樹種具一定之關聯性。耐腐朽性試驗結果，三組束狀竹層機材中係以 190°C 热處理 (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。

本年度 (112 年) 第三年之研究重點旨在探討束狀竹層積材作為工程竹構建材之研製與接合方式，將束狀竹層積材作為工程用竹材之集成元，希望藉由最適化分級，以建置最佳之加工作業製程。在國內使用國產木材製備集成材之相關研究方面，楊德新 (2007) 之研究中，以柳杉、臺灣杉設計 4 組不同配置之六層集成材，包含 3 組同等級集成材及 1 組對稱異等級集成材，其中同等級集成材為 G3H、G2H、G1H 組，分別以 11.8 GPa (L110)、10.8 GPa (L100)、9.3 - 9.8 GPa (L90) 集成元構成；異等級者則為 GI 組，最外層集成元以 13.7 GPa (L125) 集成元構成，內層則為 9.3 - 9.8 GPa (L90)。其結果顯示，柳杉 G1H 組之 MOR 與 G3H、GI 組間具有顯著差異，G1H 組有較低之趨勢，而臺灣杉之 G1H、G2H、GI 組間之 MOR 彼此均具顯著差異，由此結果可發現，使用較高機械等級之集成元進行設計之集成材，具有較優異之抗彎強度，且即使異等級 (GI) 組內層均使用等級最低之集成元，仍能體現出高 MOE 及 MOR 之結果，此即為集成效應 (Laminating effect) 之優點，外層用集成元對於集成材整體，在承受彎矩時貢獻更多之有效彈性模數。卓志隆等 (2010) 曾使用柳杉疏伐木生產之集成元，設計為三層及五層之同等級與對稱異等級集成材，並經彈性模數之預測，配置為 E75 至 E120 等級集成材，根據結果顯示，在相同彈性模數等級之設計下，對稱異等級集成材與同等級集成材經抗彎試驗所得之 MOE 與 MOR 均不具顯著差異，證明在相同設計等級下，異等級集成材之配置可更充分利用各種等級之集成元，以增進集成元之利用效率。葉民權等 (2006) 之研究中，同樣以柳杉原木生產之直接集成元製備為 8 層集成材，配置分別為 L90/L90/L60/L60 (BEG1)、L90/L70/L60/L60 (BEG2)、L90/L60/L60/L60 (BEG3) 三種之對稱異等級構成，並根據其結果顯示，雖 BEG2 及 BEG3 組僅於最外層使用 L90 等級之集成元，其抗彎性質仍能分別達 E85 - F255 及 E65 - F225 等級之規範，惟抗彎試驗之結果





中，高達 74.1% 比例之集成材，其破壞型態均發生於引張側之指接處，並推測可能與柳杉中小徑木之高未成熟材比率有關。然上述研究均主要針對我國森林蓄積量最高之柳杉，或其他針葉樹造林木樹種進行探討，以工程用竹材製備結構用集成材之相關文獻尚較為缺乏。

有鑑於此，為評估束狀竹層積材發展結構用竹集成材，以作為具有規格化之工程竹材應用之可行性，本年度以國內結構用集成材生產製程上常使用之指榫參數為基礎，進行束狀竹層基材集成元之縱向接合品質評估，後續並製成集成竹材探討其集成材品質以及建立最佳之加工作業製程。

### 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工程竹材之研製與其接合方式之探討，將束狀竹層積材作為工程竹材之集成元，進一步製備成集成材並評估其各項性質（煮沸剝離試驗、膠合剪斷試驗、抗彎性質試驗等）。

#### （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 pubescens*, Moso bamboo)，取用原竹伐採後於工廠經剖竹機將圓筒狀原竹剖成竹片，並經修整後所產生之長束狀竹絲作為試驗材料。該長束狀竹絲置於高壓蒸氣爐內進行 2 h 之蒸煮處理後，再進行 170°C 高溫熱處理，完成後保存備用。

#### （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（固形分 70-78%）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/cm<sup>2</sup>，待壓至目標厚度後持壓 10 min，以完成束狀竹層積材之製程。





### (三) 束狀竹層積材集成元之機械等級區分與製備

#### 1. 束狀竹層積材之機械等級區分

束狀竹層積材裁製為 20 mm (厚度)  $\times$  100 mm (寬度)  $\times$  850 mm (長度) 之集成元，根據 CNS 11031 (2014) 結構用集成材標準進行抗彎 B 試驗，並依測定抗彎彈性模數進行機械等級區分，如表 1 所示，以作為後續製備指接集成元之參考依據。

#### 2. 束狀竹層積材集成元之製備

將束狀竹層積材利用指榫成型機將其端部進行切削加工，其中，指榫之設定依據 CNS 11031(2014) 結構用集成材標準中針對於長度方向膠合部之品質要求，指接之斜面傾斜比應為 1/7.5 以下，並參考國內在生產結構用集成材領域上，具有正字標記之德豐木業股份有限公司之建議，依其在生產製程上常使用之指榫參數，指榫長度為 21 mm，指距為 5 mm，換算之指接斜面傾斜比為 1/8.4，接合用膠合劑選用國家標準中建議之間苯二酚-酚甲醛共縮合樹脂 (Resorcinol-phenol formaldehyde resin, RPF)，佈膠量為 250~350 g/m<sup>2</sup>，壓力為 40 kgf/cm 之條件進行長度方向接合部之膠合作業。此外，為評估用於束狀竹層積材集成元之最適化指接型態，本案參考國內業者常用之兩種指榫設計，如圖 1 所示，包含指榫先端完全密合者 (緊密型式，C-type) 及先端留有空隙者 (間隙型式，G-type)，共計兩種。

根據束狀竹層積材之機械等級區分結果，將相同機械等級者依上述指接條件進行長度方向之接合，再經表面修整後完成指接集成元之製備。在指接集成元長度方向接合部之抗彎性能方面，依照中華民國家標準 CNS 11031 (2014) 結構用集成材之抗彎 C 試驗，將上述各指接類型之集成元試片於長度方向接合部位處試材中央之條件下，設定跨距為試材厚度 25 倍，並以三分等載重模式進行抗彎性質之測定，以評估最適化之指接型態。

### (四) 束狀竹層積材集成材之強度性能設計與製備

根據指接集成元之機械等級分布，依 CNS 11031 (2014) 所規範之層積方向





上集成元品質規定進行配置，強度性能設計時，參考王松永與卓志隆（1985）研究中之抗彎彈性模數預測模型，以不考慮膠合層對整體剛性貢獻之前提，根據各層集成元之彈性模數配置預測集成材之抗彎彈性模數，本案針對束狀竹層積材與熱處理束狀竹層積材之條件各進行兩種等級之同等級集成材強度設計，並根據各集成材所得之預測彈性模數，其在 CNS 11031（2014）同等級集成材之抗彎性能基準（表 2）中所對應之強度等級進行組別區分，例如集成材預測彈性模數為 9.5 GPa 以上，未滿 10.5 GPa 者，歸類為 E95-F315 級之集成材設計。

在集成材製備方面，將束狀竹層積材集成元依照強度設計排序各層順序，在佈膠作業前，會依序進行膠合面修整、粗糙度處理及清潔作業，隨後方可進行集成作業。佈膠方式採單面佈膠（圖 2），膠合劑使用間苯二酚-酚甲醛共縮合樹脂（RPF），佈膠量為  $250 \text{ g/m}^2$ ，膠合方式採冷壓膠合（圖 3），加壓條件為  $10 \text{ kgf/cm}^2$ 。

#### （五）束狀竹層積材集成材之性質測定

束狀竹層積材集成材製備完畢後，會進行為期 5 週之養護過程，再根據中華民國國家標準 CNS 11031（2014）進行集成材之抗彎 A 試驗、浸水剝離試驗、煮沸剝離試驗、膠合剪力試驗、甲醛釋出量試驗，並評估各強度配置下之集成材是否符合 CNS11031（2014）之性能基準要求。

### 四、結果與討論

#### （一）束狀竹層積材指接集成元之抗彎性能評估

在熱處理束狀竹層積材之部分，本案使用經  $170^\circ\text{C}$  热處理之長束狀竹絲所製成的熱處理束狀竹層積材，在長度方向接合部（指接）之集成元試片製備方面，考量到若兩端指榫在完美契合之狀態下，可能存在指榫斜面所受壓力不足之風險，故將指榫設計為指榫先端留有空隙者（間隙型式，G-type），以確保各膠合斜面之加壓壓力充足，惟此設計型態亦尚有指端處局部壓力過大引發接合處破壞之風險，故同時保有指榫先端完全密合者（緊密型式，C-type）之條件，以評估應用在束



狀竹層積材集成元生產上之最適化指接型態。

熱處理束狀竹層積材之指接集成元經抗彎 C 試驗後所得之結果如表 3 所示，C-type 組內 L140 級集成元之 MOE 及 MOR 分別為 14.8 GPa 及 101.5 MPa，L125 級集成元之 MOE 及 MOR 分別為 13.2 GPa 及 97.2 MPa；G-type 組內之 L140 級集成元之 MOE 及 MOR 分別為 14.6 GPa 及 101.0 MPa，L125 級集成元之 MOE 及 MOR 分別為 13.0 GPa 及 97.7 MPa。為判定各條件之指接強度性能是否符合 CNS 11031 (2014) 標準所要求之抗彎性能品質（表 1），各等級集成元之 MOR 依照下式 1 計算抗彎強度在 75% 信賴水準下之 95% 下限值（特徵值），得 C-type 組之 L140 級與 L125 集成元的抗彎強度下限值分別為 93.1 MPa 與 85.3 MPa；G-type 組之 L140 級與 L125 集成元的抗彎強度下限值分別為 62.4 MPa 與 66.0 MPa，各組條件均可符合對應等級之抗彎性能要求（表 1）。若進一步評估逐個試片之 MOR 符合對應等級之抗彎強度平均值之比率，亦可發現全數之試片均可在標準規範平均值之上。

$$5^{\text{th}} \text{ percentile value} = \text{Mean} - K \times S.D \quad (1)$$

另一方面，圖 4 顯示束狀竹層積材經抗彎試驗破壞後，試片破壞型態之外觀狀況，其中 a 型破壞型態主要發生於指接處以外之部位，係為最理想之長度方向接合品質，表示指接處強度大於束狀竹層積材本身之強度。b 型及 c 型破壞型態主要發生在引張側之指榫斷裂，表示膠合劑本身之強度及其與束狀竹層積材間之介面強度均較指榫處強度高，亦屬膠合性能佳之表現。惟 d 型破壞型態則為指榫間直接發生相互脫離之現象，且指榫保持健全狀態，此現象顯示膠合劑本身之強度或其與束狀竹層積材間之介面強度較指榫處強度低，代表試片可能存在膠合劑滲透度不足，或膠合劑本身硬化不完全之潛在疑慮。

各條件之試片，其各種破壞型態所佔比例如表 3 所示，發現以 C-type 表現出較佳之長度方向接合部品質，其中有 18% 屬於 a 型破壞型態，b 型及 c 型破壞型態分別佔 46% 與 36%，全數試片均未發生指榫分離之現象（d 型）；G-type 則未觀察到 a 型破壞型態，b 型、c 型與 d 型破壞型態分別佔 50%、42%、8%。上



述結果指出，即使 C-type 或 G-type 之全數試片均可符合 CNS 11031 (2014) 標準所要求之集成元抗彎強度性能要求，但 G-type 組表現出具有更大之膠合性能欠佳的潛在風險，故綜合上述結果，用於本案期末進度之集成材製備及性能分析之研究所使用之集成元，將全數使用緊密型式之指榫型態設計作為加工使用參數。

## (二) 束狀竹層積材集成元之機械等級區分與集成材製備

使用 170°C 長束狀竹絲所製作而成之束狀竹層積材集成元，根據 CNS 11031 (2014) 標準進行抗彎 B 試驗後，再依照集成元之強度性能基準（表 1）區分各集成元之機械等級，結果如圖 5 所示，供本批次製備集成材之束狀竹層積材集成元的抗彎彈性模數平均值為 10.6 GPa，熱處理束狀竹層積材集成元之抗彎彈性模數平均值為 12.2 GPa，其中束狀竹層積材以 L100 與 L110 等級者佔主要比例，分別為 34.7% 與 38.8%；熱處理束狀竹層積材以 L110 與 L125 等級者佔主要比例，分別為 48.8% 與 34.1%，基於此結果，後續之集成材之強度設計係利用該三種機械等級之集成元進行。

在集成材之抗彎彈性模數預測方面，本研究係引用王松永與卓志隆 (1985) 研究中所提出之抗彎剛性預測模型進行預測。集成材之抗彎剛性 (Flexural stiffness,  $E_{preI}$ ) 可透過構成集成材要素之各層集成元之彎曲剛性總和而求得 (式 2)，惟膠合層之厚度過小，對於集成材斷面整體之剛性貢獻低，故在本研究中忽略膠合層造成之影響。該預測模型僅適用於同等級與對稱異等級集成材，本試驗之集成材層數為五層，如圖所示，將各層集成元之抗彎剛性代入式 2，並經公式展開及簡化後，即可得五層集成材之抗彎彈性模數預測值 ( $E_{pre}$ ) 公式 (式 3)。

$$E_{preI} = \sum (e_j I_j) \quad (2)$$

$$E_{pre} = \frac{\sum (e_j I_j)}{I} \quad (3)$$

$$\Rightarrow E_{pre} = \frac{12}{bt_3^3} \left[ \frac{e_1 bt_1^3}{12} + \frac{e_2 b(t_2^3 - t_1^3)}{12} + \frac{e_3 b(t_3^3 - t_2^3)}{12} \right]$$



$$\Rightarrow E_{pre} = e_3 - (e_3 - e_2) \left( \frac{t_2}{t_3} \right)^3 - (e_2 - e_1) \left( \frac{t_1}{t_3} \right)^3$$

本案設計之集成材為五層同等級集成材，配置原則是以集成元等級對於層積方向之中心軸作為對稱軸，並將抗彎彈性模數較大者作為外層用集成元使用，較小者則作為中間層或內層集成元使用，並盡可能以組內抗彎彈性模數預測值( $E_{pre}$ )變異性最低為前提進行設計。最終所設計之各組  $E_{pre}$  如表 4 所示，在束狀竹層積材集成材方面，配置為 L100 構成與 L110 構成之五層同等級集成材， $E_{pre}$  之平均值分別為 10.7 GPa、11.8 GPa；在熱處理束狀竹層積材集成材方面，配置為 L110 構成與 L125 構成之五層同等級集成材， $E_{pre}$  之平均值分別為 12.1 GPa、13.6 GPa。

### (三) 束狀竹層積材集成材強度性能設計與抗彎性質

集成材依照 CNS 11031 (11031) 標準進行抗彎 A 試驗後，所得之抗彎試驗結果，依式 (1) 計算各組集成材之 MOE 與 MOR 5% 下限值。試驗結果 (表 4) 顯示，束狀竹層積材之 L100 及 L110 構成者之 MOE 實測值的平均值分別為 11.0 GPa 及 11.7 GPa，MOE 實測值之 5% 下限值分別為 9.7 GPa 及 10.5 GPa，MOR 平均值分別為 105.0 MPa 及 111.9 MPa，MOR 之 5% 下限值為 91.5 MPa 及 95.1 MPa；熱處理束狀竹層積材之 L110 及 L125 構成者之 MOE 實測值的平均值分別為 12.5 GPa 及 13.8 GPa，MOE 實測值之 5% 下限值分別為 11.6 GPa 及 12.4 GPa，MOR 平均值分別為 90.3 MPa 及 98.4 MPa，MOR 之 5% 下限值為 67.4 MPa 及 85.5 MPa。

在 MOE 方面，束狀竹層積材 (L100 構成、L110 構成) 及熱處理束狀竹層積材 (L110 構成、L125 構成) 之預測值 ( $E_{pre}$ ) 與實測值間的差異百分率分別為 3.6%、0.8%、3.3%、1.5%，各組呈現之差異均甚低，此結果說明，若在集成材進行集成作業前，引用抗彎彈性模數模型可準確且有效率地生產預期強度性能之束狀竹層積材集成材，並對於降低產品機械性能變異性方面具有顯著助益，顯示國產竹材用於開發工程竹材之可行性。

在 MOR 方面，同樣為 L110 同等級構成之設計下，可見熱處理束狀竹層積



材相較於束狀竹層積材，MOR 有下降之趨勢。在 Percin 等 (2016) 過去之研究中指出，越高溫度之熱處理條件，將增加材料非結晶區域內半纖維素熱降解之速率，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。本案去年度 (111 年) 之研究結果中亦指出，以 170°C 热處理之束狀竹層積材，其 MOE 與 MOR 相較於未經熱處理者，分別有些微上升及下降之趨勢，與本年度之集成元機械等級區分及集成材抗彎試驗結果有相似之趨勢。

此外，熱處理束狀竹層積材相較於未經熱處理者，對於 MOE 值有不變或提高之趨勢，MOR 值則有衰減之趨勢，此現象反應在機械等級區分材及集成材強度設計上時，存在相同剛性設計下，承載能力較弱之風險。惟根據 CNS 11031 (11031) 標準中集成材之抗彎性能基準要求 (表 2)，本案製備之束狀竹層積材 L100 構成者、L110 構成者、熱處理束狀竹層積材 L110 構成者、L125 構成者分別可符合 E105-F345 級、E105-F345 級、E120-F375 級、E135-F405 級集成材之抗彎性能基準要求。綜合上述結果，指出雖然熱處理材導致集成材 MOR 有降低之風險存在，但各條件組仍可表現與設計等級相符之強度性能。

另一方面，各條件組之集成材破壞型態如圖 7 所示，無論在束狀竹層積材條件組、或是熱處理束狀竹層積材條件組中，均未出現膠合層間之剝離現象 (圖 7a、圖 7c)，束狀竹層積材集成材組，破壞均發生於引張側之纖維拉伸斷裂 (圖 7b)，而熱處理束狀竹層積材集成材組，則均為發生於引張側呈現脆性斷裂 (圖 7d)，上述結果可初步判定即使熱處理條件組仍有良好之膠合性能，惟熱處理致使材料轉變為脆性之特性，建議作為結構用途之安全性能考量方面，尚需近一部研究檢視其風險程度，或針對引張側進行補強以增進其延展性。

#### (四) 束狀竹層積材集成材之膠合性能與甲醛釋出量

束狀竹層積材集成材經抗彎試驗後，選取破壞後試體之健全部位裁切為膠合剪斷試驗，浸水剝離試驗、煮沸剝離試驗及甲醛釋出量試驗之試片，並進行對應試驗。膠合剪斷試驗之結果如表 5 所示，束狀竹層積材集成材 L100 與 L110 構



成組之膠合剪斷強度平均值為 12.7 MPa 與 12.0 MPa、木破率均為 80%；熱處理束狀竹層積材集成材 L110 與 L125 構成組之膠合剪斷強度平均值為 9.9 MPa 與 10.1 MPa、木破率為 80% 與 70%。上述結果可發現，熱處理將造成束狀竹層積材之膠合剪斷強度下降，但對於木破率之影響較小，顯示較溫和之處理條件(170°C)仍降低長束狀竹絲對於膠合劑之親和性，濕潤與滲透性降低造成彼此間之膠合性能衰減。然而，本案依據去年度（111 年）之束狀竹層積材基礎性質建置結果，判定與 CNS 11031 (2014) 標準中硬槭木、樺木、山毛櫟、櫟木、油仔木（樹種區分編號 1 類）之力學性能相似，其對應之膠合剪斷強度及木破率基準值分別為 9.6 MPa 與 60%，本案所生產之束狀竹層積材集成材，無論未經熱處理及經 170°C 热處理者，其膠合性能均尚可符合其要求。

而在膠合層之耐候性與甲醛釋出量方面，浸水剝離、煮沸剝離及甲醛釋出量試驗之結果如表 6 所示，束狀竹層積材集成材 L100 與 L110 構成組之浸水剝離試驗剝離率之平均值分別為 0.8% 與 0.0%，煮沸剝離試驗剝離率之平均值分別為 2.6% 與 0.0%；熱處理束狀竹層積材集成材 L110 與 L125 構成組之浸水剝離試驗剝離率之平均值均為 4.9%，煮沸剝離試驗剝離率之平均值分別為 4.2% 與 4.0%。上述結果指出使用本計畫建議之層積方向膠合製程參數，所生產之束狀竹層積材集成材，無論為未經熱處理及經 170°C 热處理者，其膠合層之耐候性平均表現均可符合 CNS 11031(2014) 標準之要求（剝離率在 5% 以內），可應用於 CNS 11031 (2014) 標準中所規範之 I 類使用環境，惟若考量組內變異性，熱處理 (170°C) 條件組尚有部分之試片之剝離率超過規範之基準值 (5%)，顯示未來以熱處理束狀竹層積材所生產之集成材，若欲應用於戶外之極端氣候場域時，尚存在耐候性之風險，建議應配合其他表面處理措施，避免膠合層直接暴露於高濕度之大氣或土壤，以延長產品生命週期或保障構件安全性。另一方面，各條件組之甲醛釋出量平均值與最大值均為  $<0.1 \text{ mg/L}$ ，可符合 CNS 11031 (2014) 標準中 F<sub>1</sub> 等級之品質（平均值為 0.3 mg/L 以下、最大值為 0.4 mg/L 以下）。





## 五、結論

本計畫以三年為期進行「束狀竹層積材作為工程竹材之製程與接合技術開發(3/3)」，本年度(112年)之研究重點旨在將束狀竹層積材作為竹工程用竹材之集成元，並透過指接效率研究，達成束狀竹層積材縱向指接之應用，並進一步製備集成材探討束狀竹層積材集成材之各項性質，以作為未來設計端設計施工、與相關材料選擇時之參考依據。截至期末進度為止，本計畫已完成之成果如次：

- 1、完成束狀竹層積材指接集成元之抗彎性能測試，試驗結果顯示 C-type 具有最佳之 MOR 及 MOR 下限值，由從破壞型態亦指出 C-type 具有最佳之長度方向接合部品質，故集成材係使用此指榫設計之集成元進行製備。
- 2、完成集成元之機械等級區分、指接加工作業，根據集成元機械等級區分之結果指出，束狀竹層積材集成元之機械等級以 L100 與 L110 佔主要比例(34.7%、38.8%)；熱處理束狀竹集成元之機械等級則以 L110 與 L125 佔主要比例(48.8%、34.1%)。
- 3、完成束狀竹層積材之集成材強度設計及製備，本案依據上述機械等級分佈結果，設計束狀竹層積材 L100、L110 構成之同等級集成材與熱處理束狀竹層積材 L110、L125 構成之同等級集成材，共計 4 種配置型式。
- 4、完成集成材之性質分析試驗，試驗結果指出，無論束狀竹層積材或熱處理束狀竹層積材集成材，其抗彎性能均達到與設計等級相符之抗彎性能，在膠合剪斷強度與剝離試驗結果評估方面，亦均可符合標準所要求之膠合性能與耐久性，惟熱處理束狀竹層積材集成材在同樣之剛性設計下，其承載能力有較低之趨勢，亦有較脆性及膠合強度、耐久性衰減之虞，其作為戶外之結構用途時，建議輔以補強或其他表面處理措施，以增進產品之生命週期及構件安全性。





表 1、等級區分機區分集成元之強度性能基準 (CNS 11031, 2014)

| 依機械區分<br>之等級 | MOE<br>(GPa) | MOR (MPa) |                  | 抗拉強度 (MPa) |      |
|--------------|--------------|-----------|------------------|------------|------|
|              |              | 平均值       | 下限值 <sup>1</sup> | 平均值        | 下限值  |
| L200         | 20.0         | 81.0      | 61.0             | 48.0       | 36.0 |
| L180         | 18.0         | 72.0      | 54.0             | 42.5       | 32.0 |
| L160         | 16.0         | 63.0      | 47.5             | 37.5       | 28.0 |
| L140         | 14.0         | 54.0      | 40.5             | 32.0       | 24.0 |
| L125         | 12.5         | 48.5      | 36.5             | 28.5       | 21.5 |
| L110         | 11.0         | 45.0      | 34.0             | 26.5       | 20.0 |
| L100         | 10.0         | 42.0      | 31.5             | 24.5       | 18.5 |
| L90          | 9.0          | 39.0      | 29.5             | 23.5       | 17.5 |
| L80          | 8.0          | 36.0      | 27.0             | 21.5       | 16.0 |
| L70          | 7.0          | 33.0      | 25.0             | 20.0       | 15.0 |
| L60          | 6.0          | 30.0      | 22.5             | 18.0       | 13.5 |
| L50          | 5.0          | 27.0      | 20.5             | 16.5       | 12.0 |
| L40          | 4.0          | 24.0      | 18.0             | 14.5       | 10.5 |
| L30          | 3.0          | 21.0      | 16.0             | 12.5       | 9.5  |

<sup>1</sup> 每批量集成元經 CNS 11031 (2014) 標準規定取樣後，95% 以上之強度下限值應符合對應等級之強度下限值欄位之數值。



表 2、同等級集成材之抗彎性能基準 (CNS 11031, 2014)

| 層積數                  | 強度等級      | 抗彎彈性模數(GPa) |      | 抗彎強度下限<br>值 |
|----------------------|-----------|-------------|------|-------------|
|                      |           | 平均值         | 下限值  |             |
| 同等級<br>集成材<br>(4層以上) | E190-F615 | 19.0        | 16.0 | 61.5        |
|                      | E170-F540 | 17.0        | 14.0 | 54.0        |
|                      | E150-F465 | 15.0        | 12.5 | 46.5        |
|                      | E135-F405 | 13.5        | 11.5 | 40.5        |
|                      | E120-F375 | 12.0        | 10.0 | 37.5        |
|                      | E105-F345 | 10.5        | 9.0  | 34.5        |
|                      | E95-F315  | 9.5         | 8.0  | 31.5        |
|                      | E85-F300  | 8.5         | 7.0  | 30.0        |
|                      | E75-F270  | 7.5         | 6.5  | 27.0        |
|                      | E65-F255  | 6.5         | 5.5  | 25.5        |
|                      | E55-F225  | 5.5         | 4.5  | 22.5        |

表 3、束狀竹層積材指接集成元經抗彎 C 試驗後所得之抗彎性質結果

| 條件               | 機械等級 | MOE<br>(GPa)               | MOR ( MPa)      |      | 合格率<br>(%)       | 破壞型態 <sup>3</sup> |
|------------------|------|----------------------------|-----------------|------|------------------|-------------------|
|                  |      |                            | 平均值             | 下限值  |                  |                   |
| 緊密型式<br>(C-type) | L140 | 14.8<br>(0.2) <sup>1</sup> | 101.5<br>(3.4)  | 93.1 | 100 <sup>2</sup> | a 18%, b 46%,     |
|                  | L125 | 13.2<br>(0.5)              | 97.2<br>(5.1)   | 85.3 | 100              | c 36%, d 0%       |
| 間隙型式<br>(G-type) | L140 | 14.6<br>(0.4)              | 101.0<br>(15.0) | 62.4 | 100              | a 0%, b 50%,      |
|                  | L125 | 13.0<br>(0.3)              | 97.7<br>(13.2)  | 66.0 | 100              | c 42%, d 8%       |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差

<sup>2</sup> 試片合格之判定，係判斷各別試片之抗彎強度是否符合其抗彎彈性模數所對應機械等級之抗彎強度平均值。合格率則指合格試片數量占該條件組總數之百分率。

<sup>3</sup> a、b、c、d 四種破壞型態外觀分別如圖 4 所示，百分比係指發生該種破壞型態之試片數量佔該條件組總數之百分率。



表 4、束狀竹層積材同等級集成材經抗彎 A 試驗後所得之抗彎性質結果

| 條件                | $E_{pre}$<br>(GPa) | MOE (GPa)                  |               | MOR (MPa) |                |
|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------------|
|                   |                    | 平均值                        | 5%下限值         | 平均值       | 5%下限值          |
| 束狀竹<br>層積材        | L100 構成            | 10.7<br>(0.1) <sup>1</sup> | 11.0<br>(0.4) | 9.7       | 105.0<br>(4.3) |
|                   | L110 構成            | 11.8<br>(0.1)              | 11.7<br>(0.4) | 10.5      | 111.9<br>(5.3) |
| 熱處理<br>束狀竹<br>層積材 | L110 構成            | 12.1<br>(0.0)              | 12.5<br>(0.3) | 11.6      | 90.3<br>(7.3)  |
|                   | L125 構成            | 13.6<br>(0.1)              | 13.8<br>(0.4) | 12.4      | 98.4<br>(4.1)  |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差

表 5、束狀竹層積材集成材各層積方向膠合條件之膠合剪力試驗結果

| 條件            | 強度等級    | 膠合剪斷強度 (MPa)            | 木破率 (%) |
|---------------|---------|-------------------------|---------|
| 束狀竹層積材        | L100 構成 | 12.7 (2.9) <sup>1</sup> | 80 (30) |
|               | L110 構成 | 12.0 (2.3)              | 80 (30) |
| 熱處理<br>束狀竹層積材 | L110 構成 | 9.9 (1.4)               | 80 (20) |
|               | L125 構成 | 10.1 (3.0)              | 70 (30) |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差

表 6、束狀竹層積材集成材浸水剝離、煮沸剝離與甲醛釋出量試驗結果

| 條件                | 強度等級    | 膠合層剝離率 (%)             |           | 甲醛釋出量 (mg/L) |      |
|-------------------|---------|------------------------|-----------|--------------|------|
|                   |         | 浸水剝離試驗                 | 煮沸剝離試驗    | 平均值          | 最大值  |
| 束狀竹<br>層積材        | L100 構成 | 0.8 (1.1) <sup>1</sup> | 2.6 (0.6) | <0.1         | <0.1 |
|                   | L110 構成 | 0.0 (0.0)              | 0.0 (0.0) | <0.1         | <0.1 |
| 熱處理<br>束狀竹<br>層積材 | L110 構成 | 4.9 (2.3)              | 4.2 (0.8) | <0.1         | <0.1 |
|                   | L125 構成 | 4.9 (2.7)              | 4.0 (2.9) | <0.1         | <0.1 |

<sup>1</sup> ( ) 內為標準差



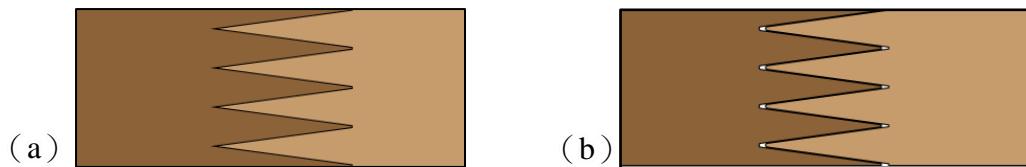


圖 1、本計畫之束狀竹層積材指接集成元指接型態設計。(a)先端完全密合者(緊密型式,C-type);(b)先端留有空隙者(間隙型式,G-type)。

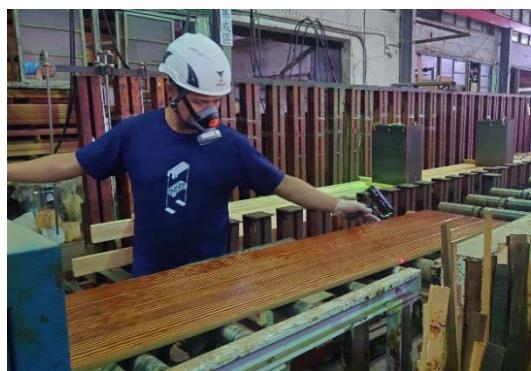


圖 2、束狀竹層積材集成元之佈膠作業。



圖 3、束狀竹層積材集成材之層積方向冷壓作業。

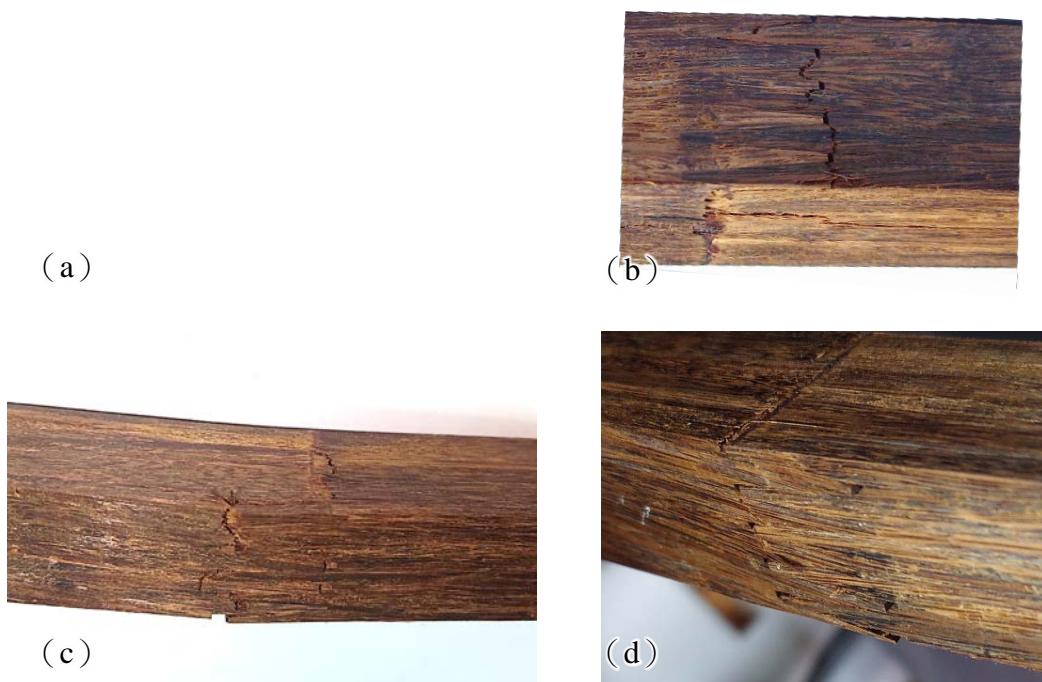


圖 4、指接集成元之破壞型態。(a)破壞於指接處以外之部位;(b)破壞於指接處及指接處以外之部位;(c)破壞於指接處,引張側指榫斷裂;(d)破壞於指接處,引張側指榫鬆脫而未發生斷裂現象。

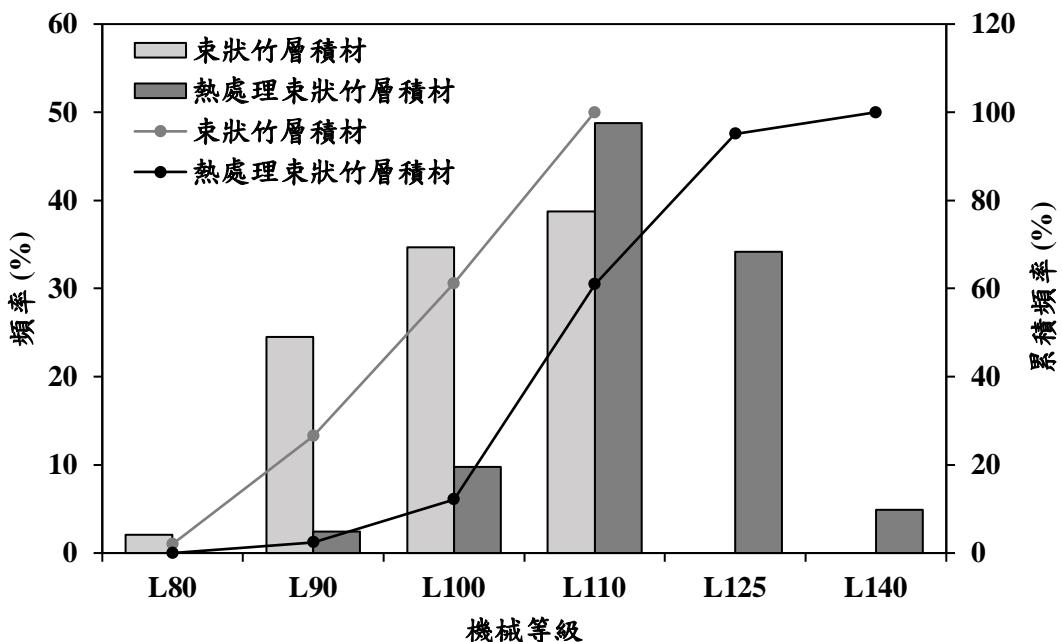


圖 5、束狀竹層積材集成元之機械等級分布。

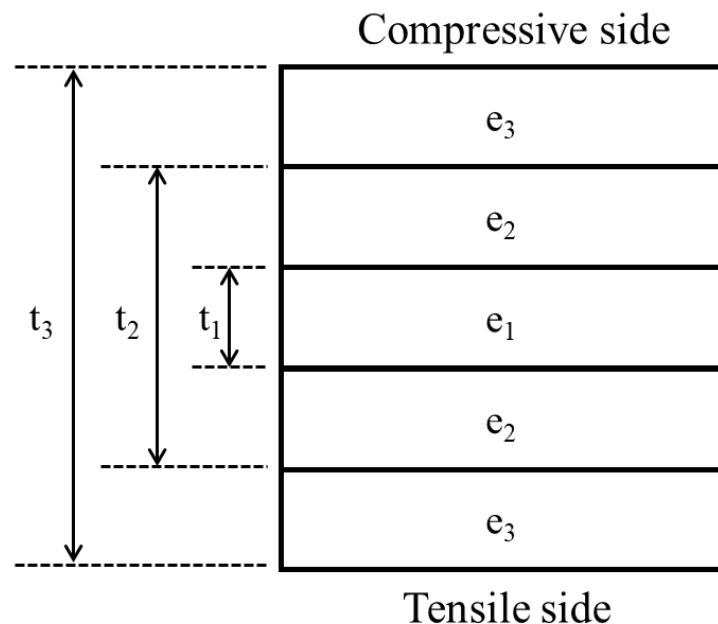


圖 6、五層集成材之層積方向剖面圖與代號參數。



圖 7、束狀竹層積材集成材之破壞型態。(a) 束狀竹層積材集成材層間破壞於材料，未出現層間剝離現象；(b) 束狀竹層積材集成材引張側破壞呈現纖維撕裂狀；(c) 热處理束狀竹層積材集成材層間破壞於材料，未出現層間剝離現象；(d) 热處理束狀竹層積材集成材引張側發生脆性破壞。





## 參考文獻

- 中華民國國家標準 CNS451 (2013) 木材密度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS452 (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 CNS453 (2013) 木材抗壓試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS454 (2013) 木材抗彎試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS455 (2013) 木材平行纖維方向剪力強度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS459(2012)木材尺度收縮率試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS460 (2013) 木材硬度試驗法。經濟部標準檢驗局。
- 中華民國國家標準 CNS11031 (2014) 結構用集成材。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。
- 李佳如、林蘭東、林志憲、楊德新 (2016) 柳杉集成元之配置對結構用集成材抗彎性質之影響。林產工業。35(1):11 - 20。
- 李佳如、張峯榕、林志憲、楊德新 (2014) 35 年生國產柳杉分等結構用材之機械性質評估。林產工業。33 (2): 61 - 70。
- 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。
- 卓志隆、顏廷諭、洪崇彬 (2010) 柳杉疏伐木製造之集成材抗彎性質評估。林產工業。29 (4): 227 - 236。





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。

郭瑋玲、盧崑宗（2012）不同溫度熱處理柳杉與束狀竹層積材木材之特性。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。

楊德新（2007）中小徑木製造構造用集成材及其工程性能之研究。國立臺灣大學森林環境暨資源學系博士論文。

葉民權、李文雄、林玉麗（2006）國產柳杉造林木開發結構用集成材之研究。台灣林業科學。21 (4): 531 - 546。

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。

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.

Boonstra, M. J., J. V. Acker, B. F. Tjeerdsma, E. V. Kegel (2007) Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. Ann. For. Sci. 64(7):679-690.

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

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.



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.

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 (*Phyllostachys edulis*) flooring. *Construction and Building Material*. 28:31 - 35.

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.

Obataya, E., P. Kitin and H. Yamauchi (2007) Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber - foam composite structure. *Wood Sci. Technol.* 41:385 - 400.

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  
27





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.

Sinha, A., D. Way and S. Mlasko (2014) Structural performance of glued laminated bamboo beams. Journal of Structural Engineering. 140(1):04013021.

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.





## 附件、112年度農業科技產學合作計畫審查意見回應表

計畫研提     期中審查     期末審查

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 (3/3)

執行單位：國立中興大學

計畫主持人：楊德新

| 項次        |   | 審查意見   | 簡述辦理情形(回應/修正/補充)   | 對應頁次  |
|-----------|---|--|--|---|
| 王委員<br>松永 | 1 | 本計畫已完成期末工作目標之要求。   | 感謝委員肯定。  | -   |
|           | 2 | 本計畫使用束狀竹層積材作為集成元，此集成元經長度接合(指接)後，求出其 MOE，再依 CNS 11031 規定，集成元配置成同等級結構用集成材(5層)，再依品質要求進行試驗，可符合 CNS 11031 抗彎 A 試驗、浸水剝離試驗、煮沸剝離試驗、膠合剪力試驗、甲醛釋出量試驗等均合格。 | 感謝委員肯定。  | -   |
| 卓委員<br>志隆 | 1 | 請檢視計畫全程執行期限與經費。  | 感謝委員建議，遵照辦理。   | -   |
|           | 2 | 請補充說明束狀竹層積材集成元與集層材之樣本數。  | 感謝委員提問，本期計畫用於抗彎性能評估之各條件組指接集成元，以及各強度配置之集成材的樣本數均為 3，對應之下限值係數為 3.152。 | -   |
|           | 3 | 請確認 p.28 中所使用之熱處理長束狀竹絲之處理溫度係 190°C 或 170°C。  | 感謝委員提問，本研究所使用之熱處理長束狀竹絲之處理溫度為 170°C，並已針對期末報告及研究報告進行修正。              | 期末暨成果<br>效益報告<br>p. 9、28<br>研究報告<br>p. 4、32 |
|           | 4 | 建議說明 G-type 指接集成元 MOR 變異性較 C-type 高的原因。  | 感謝委員建議，根據試驗破壞型態推測，可能係該條件組內部分試片在指接處之膠合性能表現較差，導致該試片之強度性能較低所致。        | -   |



|           |   |                        |   |  |
|-----------|---|------------------------|---|--|
|           | 5 | 請說明指接加壓與集成材冷壓膠合的時間     | 感謝委員的提問，本研究之集成元指接、集成材之層積方向上的冷壓，加壓時間均為18小時以上。  |  |
|           | 6 | 建議評估戶外集成材之容許應力，可供建築結構用 | 感謝委員的建議，透過本研究之結果可知束狀竹層積材在抗彎性能品質方面係可符合標準之規範值要求，故在現階段欲適用在實務場合時，本團隊建議可參考目前現行之木構造建築物設計及施工技術規範第四章節之規範值進行，在抗拉、抗壓及抗彎行為方面，可參考第四章節內對應強度等級之設計值；而在容許剪斷應力方面，則參考樹種分類1的容許應力設計值。 |  |
| 陳委員<br>財輝 | 1 | 請說明將束狀竹層積材做機械等級區分的用意何在 | 感謝委員的提問，集成材強度設計之目的，最主要係獲得預期強度性能之集成材成品，亦為集成材最為工程木竹材之最大優點，為此，需要在集成材進行集成作業前，確認構成層積方向上各層集成元之強度性能。透過集成元之機械等級區分，便可在不影響集成元承載能力之前提下確認其抗彎性能，以利後續強度設計之進行。                   |  |
|           | 2 | 能否舉例說明本次產品戶外使用案例？      | 感謝委員的提問，本期計畫之內容尚在研究階段，目前束狀竹層積材在國內之應用主要著重於地板等裝修材料，惟基於本研究成果，以及其可規格化和便於強度設計等優點，研究團隊希望未來可以朝向戶外用途之結構領域發展。  |  |
| 森林產業組     | 1 | 本研究開發之產品製程是否已具量產規模？    | 感謝組長的提問，束狀竹層積材目前礙於設備尚僅可小部分試驗生產，但在本期計畫集成竹材部分可透過集成設備之設計與製造做產業量化生產，目前也在評估中。  |  |

備註:本表不敷使用請自行新增

