

## 環氧樹脂填補木材前後之損傷評估

劉士伯<sup>1</sup>、林法勤<sup>2</sup>、廖國基<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>國立台灣大學生物產業機電工程系

<sup>2</sup>國立台灣大學森林環境暨資源學系

\*E-mail: kokki@ntu.edu.tw

### 摘要

木構造建築承受時間與外在環境條件影響甚鉅，易產生腐朽亦或裂縫成長等問題，其相關維護方式較無系統性之探討。為探討木材損傷後修補成效，本研究藉由商用有限元素分析軟體 ABAQUS，搭配自行撰寫使用者副程式 UMAT 與 DFLUX，分別描述木材組成律與木材表面水分傳遞模型，並採用延伸有限元素法與膠合損傷模型，模擬損傷修補相關行為。藉由木材拉伸試驗與扭轉剛性試驗獲致抗彎數值分析所需基本材料參數，損傷參數則藉由抗彎數值分析與抗彎試驗結果之力量-位移反應擬合獲得。將上述所得參數導入抗彎數值分析，進行三種開槽斷面形狀與三種開槽位置之填補前後抗彎數值分析，並與相對應統計後試驗結果進行比較，藉以檢視木材損傷修補流程之合宜性。

**關鍵字：**木材損傷填補，延伸有限元素法，膠合損傷模型

### 一、緒論

林業發展於台灣建構材料具有舉足輕重地位，大量開採針葉樹始於日治時期，其多用於如興建平房等民生需求，稀有珍貴之台灣紅檜則多直接運往日本作為寺廟或神社等建材使用。木構造建築優點眾多，台灣處地震頻繁帶，木材具備韌性強、彈性佳、與阻尼比高等特點，因此較鋼筋水泥建築更能弭除地震能量。木構造建築於火災發生時，木材表面經過燃燒後形成碳化層，可有效阻擋火勢往木材內部燃燒，仍可支撐主體結構不致快速崩塌。木材亦具備質地輕與易加工等優點，且與其餘建材相較屬環保建材，於加工過程中，如以同單位面積之鋼骨結構與木材結構相較，鋼材所排放二氧化碳約為木材排放量之 3.6 倍[1]，因此木構造建築幾為最契合現今大力推行綠建築理念之構築方式。

木材為一多孔質之生物性材料，惟其易隨使用時間而遭受腐朽與劣化，進而影響木材結構損傷與安全性之疑慮。台灣屬海島型氣候，高溫多濕環境容易造成傳統木構造建築顯著傷害，如何修補木構造建築因此為一重要課題，目前以木構件整根

抽換亦或利用高分子黏著劑進行修補木構件裂縫區域最為廣泛。以修補技術而言，修補時機與位置並無具體規範，有鑑於此，本研究擬針對以環氧樹脂進行木構件開槽填補後之成效進行探討。

木材於建材使用為不可或缺材料之一，其雖易隨長時間與環境變化造成顯著傷害，然拜現代科技所賜，可利用各種修補方式延長其使用壽命，修補範圍可區分為局部修補、半解體修護、與大解體修護[2]。於局部修補領域，主要作法係將木材如腐朽亦或裂縫等缺陷區域進行開槽，再填入膠料以達修補目的，惟目前並無一套具體施工標準與程序[2]，僅憑經驗進行修補，且易於過度依賴補強材料，導致木材產生難以彌補傷害。近年來科技發展迅速，電腦運算效能大幅提升，數值分析遂成為可靠工具，其可大幅降低實際試驗成本。本研究因此擬以數值分析探討木材三種開槽形狀與三種開槽位置之填補前後反應，搭配有限元素分析軟體 ABAQUS [3]，採用合理描述木材組成律與木材表面水分傳遞模型，分別撰寫使用者副程式 UMAT 與 DFLUX，並配合適當損傷模型，進行環氧樹脂填補前後木材抗彎數值

分析，並與相對應試驗結果進行比對，藉以驗證模擬之合宜性。

## 二、文獻回顧

一般木材為典型之異向性材料，其機械性質除受本身含水率、節、與材料方向性影響外，亦相當程度承受包含外在負荷、時間、溫度、與相對溼度效應等影響。Avramidis [4]分別針對四種數值模型，探討當外在環境溫度與相對溼度改變時，木材表面水分傳遞之變化，其中以 Zuritz 等人[5]提出之數值模型與試驗量測具備良好之吻合度。Hanhijärvi 與 Mackenzie-Helwein [6]根據先前單軸拉伸試驗，提出正交異向性之木材組成律，其可解釋黏彈性、塑性、濕氣膨潤、與機械吸附等效應。Stefania 等人[7]執行木材結構於不同環境條件下之三維耦合水分與應力數值分析，採用 Hanhijärvi 等人[6]提出之正交異向性組成律，外在環境相對溼度與木材表面水分傳遞之關係則採用 Zuritz 等人[5]提出之木材表面水分傳遞數值模型，執行有限元素分析，探討木材結構於外在相對溼度條件變化下之機械行為。

宋[2]指出木材承受長時間負荷與外在環境改變條件下，可能造成木材構件損壞，進而影響結構之安全性。de Moura 參與之研究團隊[8-11]根據基本樑理論與破壞力學理論，建立木材與膠合層之損傷模型，配合雙懸臂樑試驗，分別針對木材與膠合層進行不同負荷型態之試驗，藉以獲得木材與膠合層之損傷模型所需參數。Campilho 等人[12]採用前人[8-11]之木材與膠合層損傷參數，搭配商用有限元素分析軟體 ABAQUS [3]之膠合損傷模型與膠合元素，檢視碳纖維複合材料修補木材之效益。於損傷數值分析中採用膠合損傷模型與膠合元素時，需根據相對應試驗結果設定木材可能裂縫位置、長度、與成長方向後方可進行模擬分析。Moës 等人[13]採用濃縮函數(enrichment function)應用於裂縫成長分析，此新發展技術具備於裂縫可能成長區域不需重新劃分網格之優點。Sukumar 等人[14]將 Moës 等人[13]

提出之方法稱為延伸有限元素法(extended finite element method)，並將其應用於三維裂縫成長之模擬。Moës 與 Belytschko [15]進一步將裂縫可能成長區域定義為膠合區域，並結合膠合損傷模型與延伸有限元素法，模擬裂縫成長行為。延伸有限元素法發展十餘年來，已被廣泛運用於各種材料損壞之數值分析，例如 Huynh 與 Belytschko [16]將延伸有限元素法應用於探討複合材料之介面損傷行為，Unger 等人[17]應用其於混凝土之裂縫成長數值分析，及 Ashari 與 Mohammadai [18]應用其於正交異向性碳纖維材料之損傷評估。

## 三、試驗量測

因木材屬異向性材料，於模擬過程中需要各方向楊氏係數及波松比，與各平面之扭轉剛性。本研究利用基本試驗獲得相關參數，並規劃抗彎試驗檢視木材損傷過程。選擇台灣木造建築常用之杉木(*Cunninghamia lanceolata*)為試材，進行縱向拉伸試驗、橫向拉伸試驗、扭轉剛性試驗、與抗彎試驗。

### 3.1 拉伸試驗

製作完之拉伸試材架設於萬能試驗機，如圖 1 所示，將試材上縱向與橫向應變規之延伸導線連接至訊號擷取卡相對應腳位。以 2~3 mm/min 拉伸速率進行試驗，訊號擷取卡可分別獲致萬能試驗機輸出負荷與應變規量測之電壓變化量，藉由 LabVIEW [19]獲致應力-應變曲線，接續轉換為各方向之楊氏係數與波松比。



圖 1 拉伸試驗設置

### 3.2 扭轉剛性試驗

國內目前於扭轉剛性並無明確標準規範，且受限於試驗設備，本研究參考美國材料實驗協會(America Society for Testing and Materials, ASTM) D198 規範，於此採用以萬能試驗機搭配小型扭轉剛性夾具。試材採用 CNS 454 木材抗彎強度試驗法[20]之試材製作。本試驗採用 Saint-Venant 扭轉理論[21]，並以萬能試驗機取代扭轉試驗機，其架設方式如圖 2 所示，將試材固定於夾具上，夾具則由鋁擠型架構固定，當萬能試驗機帶動鋁擠型架構下降時將施加一力量 可接續轉換為扭轉剛性。



圖 2 扭轉剛性配置

### 3.3 抗彎試驗

本試驗依據 CNS 454 木材抗彎強度試驗法[20]第五節之試材製作，試材為正方形橫斷面柱體，斷面邊長為 30 mm，下方兩支撐點之距離為斷面邊長 14 倍，試材長度為 500 mm。主要探討木材於不同開槽形狀與不同位置之損壞情形，可分為上板路、水平、與下板路開槽，如圖 3 所示。搭配矩形斷面、倒三角斷面、與半圓加矩形斷面三種型式，以花鈹機進行人工開槽，獲致三種開槽形狀與三種開槽位置各四根試材進行抗彎試驗，斷面溝槽尺寸如圖 4 所示，其中為配合花鈹機之刀具尺寸限制，以寬度為 9 mm 進行開槽。

抗彎試驗採用三點荷重進行量測，將製作完試材架設於萬能試驗機上，其下方由兩塊直徑為 3 cm 半圓鐵塊支撐，上方則由萬能試驗機帶動弧形探頭產

生向下位移，其中弧形探頭直徑約為 4.8 cm。根據 CNS 454 木材抗彎強度試驗法[20]，載重體需以恆定速率進行，因此弧形探頭之下降速率為 2 mm/min，並藉由萬能試驗機紀錄相對應荷重與位移資訊。



圖 3 開槽位置示意

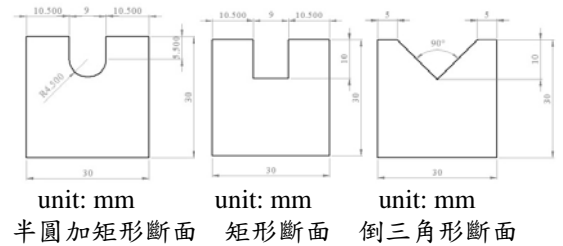


圖 4 斷面溝槽尺寸

## 四、數值分析

本研究係利用商用有限元素分析軟體 ABAQUS [3]，根據材料組成律與木材表面水分傳遞模型，搭配自行撰寫之使用者副程式 UMAT 與 DFLUX，並採用膠合損傷模型模擬木材損傷過程，其模擬流程如圖 5 所示。

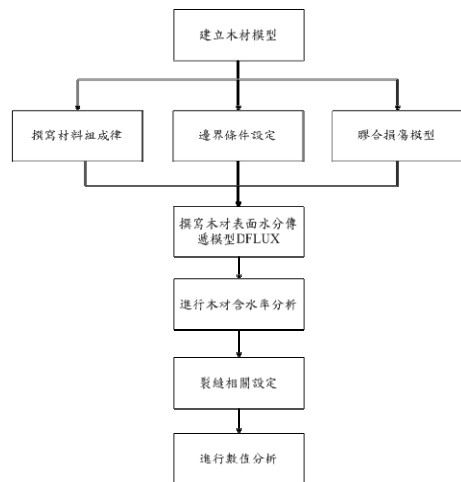


圖 5 數值分析流程

木材組成律可描述彈性、濕氣膨潤、黏彈潛變、與機械吸附潛變等效應，並利用使用者副程式 UMAT 進行撰寫。木材表面水分傳遞模型主要描述外在環境相對溼度變化與木材表面水分傳遞之關係，其利用使用者副程式 DFLUX 進行撰寫。木材損傷模型則採用膠合損傷模型並配合二次判準進行損傷分析。木材損傷模型則採用膠合損傷模型並配合二次判準進行損傷分析。邊界條件設定係根據抗彎試驗設置，如圖 6 所示。數值分析中，網格敏感度為一重要課題，針對木材模型中裂縫可能成長區域，鋪設不同網格層數進行分析，當網格層數達 24 層時，其力量與位移反應趨於穩定，因此採用 24 層網格應用於木材數值分析。此外，本研究以延拓有限元素法(XFEM)描述裂縫相關行為，此技術具備於裂縫可能成長區域不需重新劃分網格之優點。基於抗彎試驗結果將裂縫初始位置設置於試材中央處，裂縫成長路徑則不因設定初始方向不同而改變。本研究採用膠合損傷模型描述木材之裂縫成長行為，惟膠合損傷參數取得不易，因此部分參數根據 Campilpho 等人進行雙懸臂樑試驗獲得木材損傷參數，其餘參數則以抗彎試驗結果與數值計算結果進行擬合。

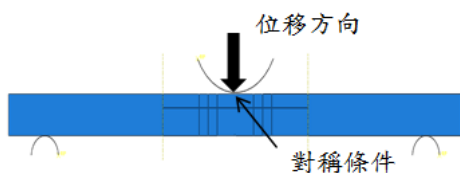


圖 6 抗彎數值分析之邊界條件設定

此外，木材為異向性材料，於數值分析中需定義木材模型為相互垂直之縱向，弦向，與徑向材料方向。根據前述其裂縫均沿垂直方向成長，惟抗彎試驗結果顯示部分木材裂縫並非沿垂直方向成長。根據王[21]觀察木材於引張側倘若存在斜走木理，裂縫並非沿垂直方向成長。於此將木材模型之木理傾斜角，其定義為木理(縱向)方向與試材縱軸之夾角，設為

15°。其計算結果如圖 7 所示，其顯示裂縫沿斜走木理方向而非沿垂直方向成長。

本研究亦進行抗彎試驗試材之年輪傾斜角探討，其為弦向方向與試材底面之夾角。根據試驗觀察，試材夾角範圍約為 0°~90°。本研究為探討年輪傾斜角對於力量-位移反應與裂縫成長方向之影響，將木材模型之年輪傾斜角分別設置為 0°、15°、30°、45°、60°、75°、與 90°。採用矩形上板路開槽模型進行抗彎數值分析，其力量-位移反應如圖 8 所示，其顯示具備不同年輪傾斜角之力量-位移反應差異並不顯著，且裂縫皆沿垂直方向成長。

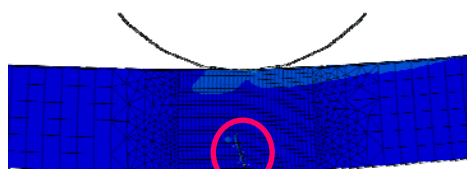


圖 7 矩形上板路開槽之木理傾斜角 15°數值分析結果

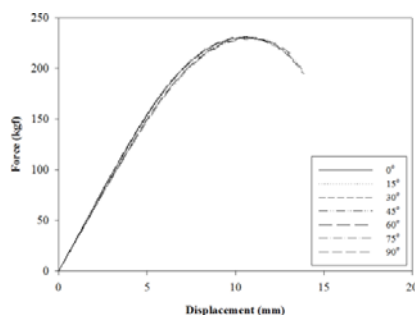


圖 8 矩形上板路開槽具備不同年輪傾斜角之力量-位移反應

## 五、杉木抗彎試驗結果與數值分析結果探討

### 5.1 杉木開槽後抗彎試驗結果與數值分析結果分類與比較

杉木開槽後抗彎試驗與數值分析結果除比較相對應力量-位移反應外，亦進行裂縫成長結果比對。因三種斷面形狀之裂縫成長差異並不顯著，於此僅挑選倒三角形斷面之上板路開槽、水平開槽、與下板路開槽之試材與相對應數值分析之裂

縫成長結果進行比對，如圖 9 至圖 11 所示。由抗彎數值分析結果可得各位置開槽之裂縫成長皆大致沿垂直方向，與試驗觀察結果相符。

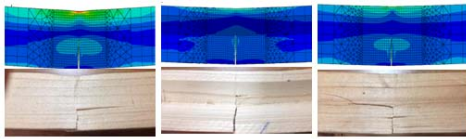


圖 9 倒三角形斷面上板路開槽之裂縫成長比對圖  
 圖 10 倒三角形斷面水平開槽之裂縫成長比對圖  
 圖 11 倒三角形斷面下板路開槽之裂縫成長比對圖

礙於篇幅限制，杉木開槽後抗彎數值分析與抗彎試驗之力量-位移反應比較，僅列出半圓加矩形開槽結果，其分別顯示於圖 12 至圖 14。本研究將九種抗彎數值分析與抗彎試驗結果平均值進行分類比較可得，於相同開槽形狀不同開槽位置之力量-位移反應顯示，分析所得線性區段斜率均以水平開槽為最大，下板路開槽次之，上板路開槽最小，此趨勢與試驗結果平均值相符。可承受最大力量均以水平開槽為最大，上板路開槽次之，下板路開槽最小，此趨勢與矩形及倒三角形開槽形狀試驗結果平均值相符，然與半圓加矩形開槽形狀試驗結果平均值不相符原因可能在於，半圓加矩形之上板路開槽試材密度與秋材率顯著小於水平與下板路開槽試材，導致其可承受力量減弱。最大力量之相對位移均以上板路開槽為最大，下板路開槽次之，水平開槽最小，此趨勢與上板路開槽試驗結果平均值最大相符，水平開槽與下板路開槽試驗結果差異則不顯著；於不同開槽形狀相同開槽位置之力量-位移反應顯示，分析所得線性區段斜率均以半圓加矩形開槽為最大，矩形開槽次之，倒三角形開槽最小，此趨勢與倒三角形開槽試驗結果平均值最小相符，半圓加矩形開槽與矩形開槽試驗結果差異則不顯著。可承受最大力量均以半圓加矩形開槽為最大，矩形開槽次之，倒三角形開槽最小，此趨勢與倒三角形開槽試驗結果平均值最小相符，半圓加矩形開槽與矩形開槽試驗結果差異則不顯著。最大力量之相對位移則以半圓加矩形開槽為最大，矩形開槽次之，倒三角形開槽最小，然於試驗

結果平均值中並無一致趨勢。

於杉木開槽後抗彎數值分析亦可得抗彎彈性係數，並與杉木開槽後抗彎試驗結果平均值進行比較。於相同開槽形狀不同開槽位置顯示，分析所得抗彎彈性係數均以下板路開槽為最大，上板路開槽次之，水平開槽最小，此趨勢與試驗結果平均值相符；於不同開槽形狀相同開槽位置顯示，分析所得抗彎彈性係數均以倒三角形開槽為最大，矩形開槽次之，半圓加矩形開槽最小，此趨勢與倒三角形開槽試驗結果平均值最大相符，半圓加矩形開槽與矩形開槽試驗結果差異則不顯著。

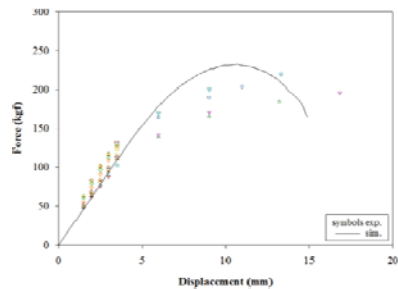


圖 12 半圓加矩形上板路開槽後之數值分析與試驗結果比較

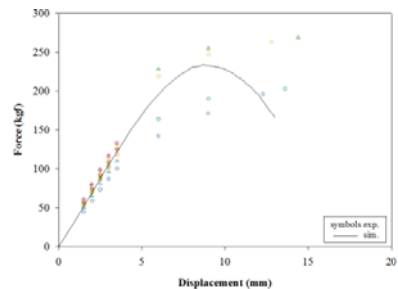


圖 13 半圓加矩形水平開槽後之數值分析與試驗結果比較

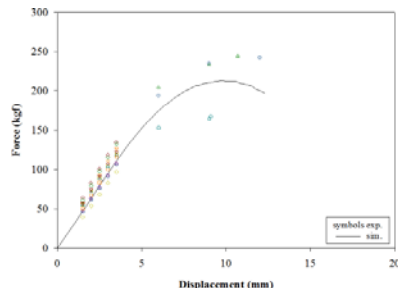


圖 14 半圓加矩形下板路開槽後之數值分析與試驗結果比較

## 5.2 杉木開槽填補後抗彎試驗結果與數值分析結果分類與比較

礙於篇幅限制，杉木開槽填補後抗彎數值分析與抗彎試驗之力量-位移反應比較，僅列出半圓加矩形開槽填補後結果，其分別顯示於圖 15 至圖 17。本研究將九種抗彎數值分析與平均抗彎試驗結果進行分類比較可得，於相同填補形狀不同填補位置之力量-位移反應顯示，分析所得線性區段斜率均以水平填補為最大，下板路填補次之，上板路填補最小，此趨勢與試驗結果平均值相符。可承受最大力量均以水平填補為最大，上板路填補次之，下板路填補最小，此趨勢與試驗結果平均值相符；於不同填補填補形狀相同填補位置之力量-位移反應顯示，分析所得線性區段斜率均以半圓加矩形填補為最大，矩形填補次之，倒三角形填補最小，此趨勢與倒三角形填補形狀試驗結果平均值最小相符，半圓加矩形填補與矩形填補抗彎試驗結果差異則不顯著。可承受最大力量均以半圓加矩形填補為最大，矩形填補次之，倒三角形填補最小，此趨勢與倒三角形填補形狀試驗結果平均值為最小相符，半圓加矩形填補與矩形填補試驗結果差異不顯著。於杉木開槽填補後抗彎數值分析亦可得抗彎彈性係數，並與杉木開槽填補後抗彎試驗結果平均值比較。於相同填補形狀不同填補位置顯示，分析所得抗彎彈性係數均以水平填補為最大，下板路填補次之，上板路填補最小，此趨勢與試驗結果平均值相符；於不同填補形狀相同填補位置顯示，分析所得抗彎彈性係數均以半圓加矩形填補為最大，矩形填補次之，倒三角形填補最小，此趨勢與倒三角形填補形狀試驗結果平均值為最小相符，半圓加矩形填補與矩形填補試驗結果差異則不顯著。

進一步將填補前後之抗彎數值分析進行比較，對於三種填補形狀與三種填補位置而言，其線性區段之平均斜率與平均可承受最大力量，均顯示填補後試驗結果較大。此外，對於相同填補形狀之水平位置而言，平均抗彎彈性係數均顯示填補後試驗結果大於填補前試驗結果，惟上板路

與下板路填補不符合此趨勢，推測其承受面積慣性矩影響較大，導致填補後平均抗彎彈性係數較小。

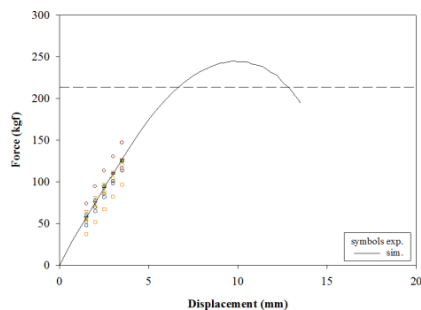


圖 15 半圓加矩形上板路開槽填補後之數值分析與試驗結果比較

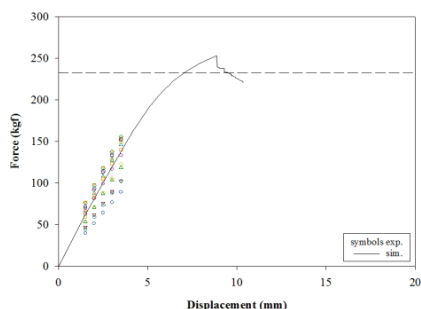


圖 16 半圓加矩形水平開槽填補後之數值分析與試驗結果比較

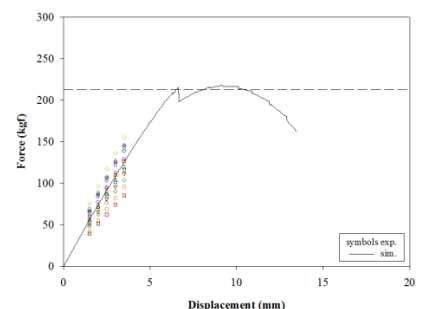


圖 17 半圓加矩形下板路開槽填補後之數值分析與試驗結果比較

## 六、結論與未來展望

本研究透過有限元素分析，搭配自行撰寫之木材組成律與木材表面水分傳遞模型，並採用延伸有限元素法與膠合損傷模型進行木材開槽填補前後之抗彎數值分析，其中延伸有限元素法除不需於裂縫可能成長區域進行網格重新劃分，亦毋需

事先設定裂縫可能成長路徑。木材基本材料參數係藉由拉伸試驗與剛性扭轉試驗結果而得，木材損傷參數則藉由抗彎數值分析與抗彎試驗結果之力量-位移反應進行擬合獲得。為探討不同開槽形狀與位置之填補前後抗彎試驗結果差異性，以 Tukey 事後比較法進行線性區段斜率、可承受最大力量、最大力量之相對位移、與抗彎彈性係數比較，惟 Tukey 事後比較法顯示僅少數幾組具有顯著差異，其餘皆顯示無顯著差異。為與數值分析結果進行比較，本研究以抗彎試驗結果平均值與數值分析進行比較，其所得力量-位移反應之線性區段斜率、可承受最大力量、最大力量之相對位移、與抗彎彈性係數大致均具備良好吻合度。此外，將三種開槽形狀與三種開槽位置之填補前後木材進行抗彎試驗與數值分析，兩者呈現相符裂縫成長方向。

本研究撰寫之木材組成律同時考慮濕氣膨潤、黏彈潛變、與機械吸附等效應，未來可應用於如探討木材長時間之潛變行為，亦或耦合計算流體動力學探討木材於乾燥過程之含水率變化與可能裂縫發展，並配合相對應試驗進行驗證。

## 七、參考文獻

- [1] 塗三賢。2007。台灣地區木構造住宅對碳貯存與二氧化碳減量之貢獻。博士論文。台北:國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所。
- [2] 宋致行。2004。環氧樹脂之應用於木通梁構件損壞修護補強之研究。碩士論文。台南:國立成功大學建築研究所。
- [3] Hibbit, H. D., B. I. Karlsson, and E. P. Sorensen. 2011. ABAQUS User Manual. Version 6.11. USA.
- [4] Avramidis, St. 1989. Evaluation of "three-variable" models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. *Wood Science and Technology* 23: 251-258.
- [5] Zuritz, C., R. P. Singh, S. M. Moini, and S. M. Henderson. 1979. Desorption isotherms of rough Spruce from 10 to 40 degree Celsius. *Transactions of the ASAE* 22: 433-440.
- [6] Hanhijärvi, A., and P. Mackenzie-Helnwein. 2003. Computational analysis of quality reduction during drying of lumber due to irrecoverable deformation. I: orthotropic viscoelastic-mechanosorptive-plastic material model for the transverse plane of wood. *Journal of Engineering Mechanics* 129: 996-1005.
- [7] Stefania, F., M. Florian, and T. Toratti. 2009. A 3D moisture –stress FEM analysis for time dependent problem in timber structures. *Mech Time-Depend Mater* 13: 333-356.
- [8] de Moura, M.F.S.F., J. J. L. Morais, and N. Dourado. 2008. A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test. *Engineering Fracture Mechanics* 75: 3852-3865.
- [9] de Moura, M.F.S.F., M. A. L. Silva, A. B. de Morais, and J. J. L. Morais. 2006. Equivalent crack base mode II fracture characterization of wood. *Engineering Fracture Mechanics* 73: 978-993.
- [10] de Moura, M.F.S.F., R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Goncalves. 2008. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology* 68: 2224-2230.
- [11] de Moura, M.F.S.F., R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Goncalves. 2009. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International Journal of Solids and Structures* 46: 1589-1595.
- [12] Campilho, R. D. S. G., M. F. S.F. de Moura, A. M. J. P. Barreto, J. J. L. Morais, and J. J. M. S. Domingues. 2009. Fracture behavior of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch. *Composites* 40(A): 852-859.
- [13] Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko. 1999. A finite element method for crack growth without remeshing.

- International Journal for numerical Methods in Engineering 46: 131-150.
- [14] Sukumar, N., N. Moës, B. Moran, and T. Belytschko. 2000. Extended finite element method for three-dimensional crack modeling. International Journal for numerical Methods in Engineering 48: 1549-1570.
- [15] Moës, N., and T. Belytschko. 2002. Extended finite element method for cohesive crack growth. Engineering Fracture Mechanics 69: 813-833.
- [16] Huynh, D. B. P., and T. Belytschko. 2009. The extended finite element method for fracture in composite materials. International Journal For Numerical Methods in Engineering 77: 214-239.
- [17] Unger, J. F. , S. Eckardt, and C. Könke. 2007. Modelling of cohesive crack growth in concrete structures with the extended finite element method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 196: 4087-4100.
- [18] Ashari, S. E., and S. Mohammadi. 2011. Fracture analysis of FRP-reinforced beams by orthotropic XFEM. Journal of Composite Materials 46: 1367-1389.
- [19] Walters, T. 2013. LabVIEW User Manual. Version 2013. USA.
- [20] 經濟部標準檢驗局。2011。CNS 454 木材抗彎試驗法。中華民國國家標準。
- [21] Khokhar, A., H. Zhang, D. Ridley-Ellis, and J. Moore. 2008. Determining the shear modulus of sitka spruce from torsion tests. Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering: 292.
- [22] 王松永。1971。木材物理學。徐氏文教基金