

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

合板因含水率變化之翹曲

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2313-B-415-004-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立嘉義大學林產科學系

計畫主持人：王怡仁

共同主持人：蘇文清

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 11 月 1 日

## 摘要

木材由於具有收縮異方性及其他性質如節、未成熟材、年輪的曲率半徑、板到髓心的距離和螺旋木理等，會因吸脫濕而變形。具平衡結構的合板會因為含水率分佈不均而產生翹曲。本研究的目的在了解合板因含水率差所引起的翹曲，並與利用有限元素法預測的翹曲相比較。實驗使用四層具有不同含水率放射松旋切單板配合環氧樹脂製造合板，合板中單板的含水率有四種假想的組合。膠合好的合板置於溫度為 20°C，相對濕度為 40%、65% 和 90% 的環境調濕，合板會因為單板的水份梯度在達到平衡時產生翹曲，記錄合板兩互相垂直中心線的翹曲。翹曲的預測利用有限元素法進行，並與實測值相比較。結果發現四種合板的中心翹曲或最大翹曲在相對濕度為 65% 時有最小值，而在相對濕度為 40% 時有最大值。在相同的濕度下，實測及預測的中心翹曲及最大翹曲會隨著單板之間含水率差的增加而增加。由於用於有限元素法的材料性質並非放射松實測值，預測的最大翹曲較實測值高。

【關鍵詞】合板、翹曲、有限元素法，水分梯度

## Abstract

Due to the anisotropic shrinkage and other characteristics such as knot, juvenile wood, annual ring curvature, spiral grain angle, distance to pith, and so on, wood warps when its moisture content changes. The structurally balanced plywood warps mainly due to nonuniformly distributed moisture content. The objective of this study is to measure the warp of plywood which is constructed with four veneers with different moisture contents and predict the warp by application of finite element method. Rotary-cut veneers of radiate pine with equal thickness of 2 mm were used to manufacture four-layer plywood. The veneers were conditioned according to four planned scenarios and then glued by epoxy without altering the moisture contents of the veneers. The plywood was reconditioned in three chambers with temperature at 20°C and relative humidity at 40%, 65% and 90% to induce warping. The warping of the two center lines of plywood were measured. The prediction of the warp of plywood was carried out by finite element method. The center warping and maximum warping were found to have minimum value for all plywood when conditioned at relative humidity of 65%, and maximum value when conditioned at relative humidity of 40%. At the same relative humidity, the measured and predicted warp values increased with the increase of moisture gradient between veneers. The predicted values are larger than the measured ones due to the input material properties in the finite element model were not the actual values of radiate pine.

【Key words】plywood, warping, finite element method, moisture gradient

## I. 前言

木材由於具有收縮異方性及其他缺點如螺旋木理等，在乾燥過程及使用期間會因吸脫濕而導致變形。一般翹曲變形包括弓狀翹曲(bow)、瓦狀翹曲(cup)、駝背翹曲(crook)、扭曲(twist)。Hsu and Tang (1975)認為木材因含水率變化而變形的三個主要因子為 1.木材性質之不均性(inhomogeneity of the properties of wood)，2.乾燥過程中不均勻的含水率分佈(nonuniform distribution of moisture content)和 3.木材的圓柱異方性(cylindrical anisotropy of the wood)。在他們的論文中，將(1)(2)項忽略，則在沒有約束下之瓦狀翹曲主要由圓柱異方性所引起，他們仿熱應力的分析推導出瓦狀翹曲是收縮係數，木板橫切面的幾何形狀及木板到髓心距離三者的函數。之後，Fridley and Tang (1993)延伸 Hsu & Tang (1975)的研究，進而以數值方法預測弓狀、駝背及扭狀變形。Johansson and Kliger (2002)認為影響翹曲因子包括螺旋木理角度 (spiral grain angle)、板到髓心的距離(distance from the pith)、未成熟材(juvenile wood)、節(knots)、壓縮材(compression wood)、年輪寬(ring width)和密度。他們以木理角(grain angle)及年輪的曲率半徑(annual ring curvature)為參數，利用迴歸方法預測扭曲，但對於駝背翹曲和弓狀翹曲則無法以他們所量測的參數來解釋，不過也發現壓縮材的分佈和駝背翹曲和弓狀翹曲的方向有密切關係。之後 Johansson (2003)利用縱向收縮率在橫切面及縱向的變異解釋弓狀及駝背變形。Simpson and Gerhardt (1984)曾證明駝背翹曲是由於板材兩相對窄面的縱向收縮率不一所致。Johansson *et al.* (2001) 扭曲和含水率、螺旋木理及年輪的弧度有很大的關聯，而和收縮應變(同收縮率)、密度及年輪寬的關係較弱。Kliger *et al.* (2003) 發現縱向收縮在間柱的兩面的差異比縱向收縮在縱向的變異更能解釋弓狀及駝背翹曲。他們認為弓狀翹曲是由於縱向收縮在寬面的差延縱向分佈所造成。而縱向收縮在窄面的差延縱向分佈會造成駝背翹曲。Perstorper *et al.* (1994)發現扭曲和駝背翹曲在靠近髓心有最大值，扭曲則隨著距髓心的距離增加而迅速降低，但駝背翹曲降低較緩。Ormarsson *et al.* (1998,1999 和 2000)則利用有限元素法預測板材或間柱因含水率改變所引起的變形。

合板是由旋切單板膠合而成，原先很多影響木材翹曲的因子如節、反應材、木理方向、未成熟材和螺旋木理等等都會因為合板製作的特性而分散，另外合板結構一般都採對稱結構，所以其尺寸安定性比等厚的木材好。但是二次加工可能造成不平衡的結構，不平衡的結構將導致合板因含水率改變而翹曲，而平衡的結構也可能因為含水率分佈不均而產生翹曲。可以說板之翹曲主要是由水份梯度或配上不對稱結構所引起，一旦發生只能予以更換，但也不能確保更換者就不會再翹曲(Wood Handbook,1999)。Suchsland and McNatt (1986)利用 Norris 在 1964 年所提出的方法預測火炬松(loblolly pine)三層合板的變形，並將方法寫成電腦程式以方便改變表底板的性質，進而預測在一推合板中翹曲的變異。Suchsland (1990)又利用 Norris (1964)所發展的公式計算粒片板心材合板的翹曲，他認為翹曲是由於不對稱結構所引起，而含水率的變化會加劇翹曲的發生。Suchsland *et al.* (1994)又根據 Norris 的理論針對有貼面和無貼面之粒片板比較預測和實測的變形，發現三層對稱結構能有效防止翹曲。Tong and Suchsland (1993)利用有限元素法研究花旗松木板因水分梯度所引起的翹曲，但並未和實際情形作比較。Cai and Dickens (2004)將複合板視為層板結構，

每一層各具有不同的材料特性，例如彈性模數、剪斷模數、膨脹係數、波松比、各層角度、含水率差及厚度等，他們推導出一個可以預測二維翹曲的數學模式。

在過去的研究中可發現有關合板因含水率改變的翹曲，雖可利用理論解或可利用數值分析如有限元素法進行預測或模擬，但要以實驗證明卻有困難(Tong and Suchsland,1993)，而如果要在一塊合板內改變各層單板的含水率以造成含水率差，在實際作業有其困難，所以在模擬或預測合板的變形不易精確的進行。如果先將單板予以精確調濕，再以非水溶性的膠予以膠合成合板，則能精確的控制合板內的水分梯度，如此將能使有限元素法的預測結果能和實際翹曲相印証。本研究的目的是了解合板因含水率差所引起的翹曲，並與利用有限元素法預測的翹曲相比較。

## II. 材料與方法

### 一、試驗材料

1. 放射松(radiata pine)單板：為放射松弦切單版，長 100cm，直徑為 38cm 之放射松原木旋切得到厚 2mm 之弦切單板，並切成 1000×1000×2mm 之尺寸，再進一步切成 240×240×2mm 之單板。
2. 膠合劑：為 PERMA 環氧膠(epoxy)。型號 #4M-4H，固形份 100%。

### 二、試驗方法

#### 1. 合板

合板由 4 層單板構成，表底板的木理平行，而兩心板的木理和表底板垂直，此合板在厚度和木理方向均為對稱。旋切單板依表 1 所列的含水率組成進行調濕。調濕好的單板使用非水溶性的環氧膠膠合，以避免水溶性的膠中的水分影響單板的含水率，組合好的合板利用冷壓機加壓使膠硬化，之後將膠合好的合板置於溫度為 20℃，但相對溼度不同的環境使其平衡，此三種環境之溫度與相對濕度的組合列在表 2，在此三種環境下木材的平衡含水率，分別為 8%、12%和 20%。本實驗有 4 種合板，3 種環境的相對溼度，如此構成 12 種組合，每一種組合製作 12 塊合板。

表 1 單板之含水率(%)

單板層號	1	2	3	4
角度(°)	0	90	90	0
合板 A	0	12	20	30 以上
合板 B	0	12	12	30 以上
合板 C	0	20	20	30 以上
合板 D	30	30	30	30 以上

表 2 三種環境下放射松單板的平衡含水率

相對溼度(RH%)	溫度(°)	含水率(%)
40	20	8*
65	20	12
90	20	20

\*實際含水率小於 8%

將已達平衡的合板加以修邊後，以針盤指示計(dial gauge)在合板的縱向與橫向的中線上每 2 cm 的點測量其翹曲量。

## 2. 有限元素分析

利用 ANSYS 進行有限元素分析，模擬 4 層合板因水分梯度所引起的翹曲，合板模型尺寸為 240×240×2mm，模型所使用之材料性質為西部白松(western white pine)的資料如表 3 所示。

表 3 西部白松基本性質

彈性模數(GPa)			剪斷模數(GPa)			波松比			吸濕膨脹係數( $10^{-4}$ )		
$E_L$	$E_R$	$E_T$	$G_{LR}$	$G_{LT}$	$G_{RT}$	$\nu_{LR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{RT}$	$\alpha_L$	$\alpha_R$	$\alpha_T$
11.4	0.81	0.46	0.69	6.51	0.06	0.33	0.34	0.41	1.50	7.50	14.5
0											0

模擬時首先建立四層層狀結構，並以 SOLID185 元素進行網目分割，共計有 2700 個元素和 3328 個節點。拘束條件為在底部三個頂點於厚度方向加

以限制。合板結構中以表底層為 0°木理角，中間 2 層之木理角則為 90°，形成交錯排列組合。各層之含水率設定如表 1 所示，模擬當合板置於 20°C，相對濕度為 65%，即平衡含水率為 12%時的翹曲情形。

### III. 結果與討論

#### 1. 合板之翹曲

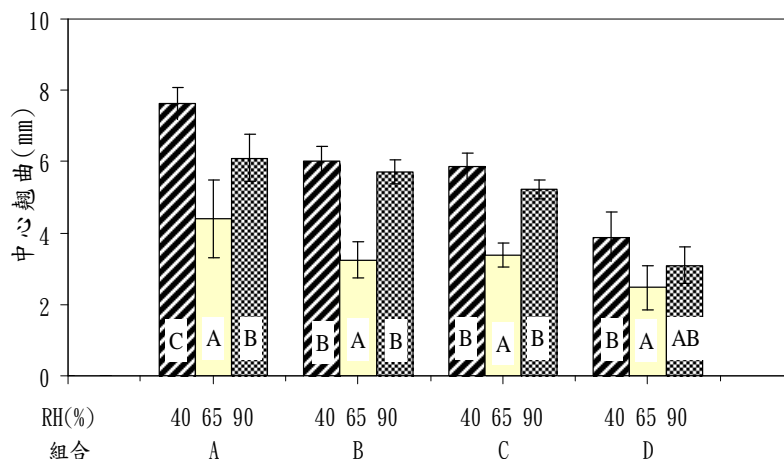
四種合板在三種環境下的中心翹曲列在表 4。在相對溼度為 40%時，合板的中心翹曲分佈在 3.89 至 7.62mm 之間；相對溼度為 65%時，合板的中心翹曲分佈在 2.47 至 4.38mm 之間；相對溼度為 90%時，則是分佈在 3.10 至 6.11mm 之間。圖 2 為每一種合板在不同相對溼度下的中心翹曲。由表 4 及圖 2 顯示所有合板組合的中心翹曲都以在相對溼度為 65%時為最小。以 A 組為例，A 組在 20°C、40%RH 的水分梯度變化由底層至上層為 +8/-4/-12/-22%；在 20°C、65%RH 的水分梯度變化為 +12/0/-8/-18%；而在 20°C、90%RH 之水分梯度的變化則為 +20/+8/0/-10%。觀察三種水份梯度，可發現在相對溼度為 65%和 90%時的水份梯度中各有零翹曲的層，而由此零翹曲的層到最外層的水分梯度在 65%RH 是 -18%，而在 90%RH 是 +20%，所以在相對溼度為 65%的合板有較小的翹曲量；而在相對溼度為 40%時，因有一層膨脹三層收縮，所以具有最大的翹曲量。

表 4 合板於三種相對濕度下之中心翹曲(mm)

合板	在 20°C 之相對溼度(%)		
	40	65	90
A	7.62C <sup>1</sup> c (0.92) <sup>2</sup>	4.38Bb (2.18)	6.11Ac (1.33)
B	6.01Bb (0.85)	3.25Aab (1.01)	5.73Bbc (0.66)
C	5.87Bb (0.75)	3.39Aab (0.67)	5.23Bb (0.51)
D	3.89Ba (1.39)	2.47Aa (1.24)	3.10ABa (1.01)

1 英文字母為鄧肯(Duncan)多變域分析在顯著水準為 0.05 的檢定結果，大寫字母為同行間比較，而小寫字母為同行間比較，字母相同者表示差異不顯著。

2 括弧內數字為標準差。



註:英文字母為鄧肯(Duncan)多變域分析在顯著水準為 0.05 的檢定結果，同組中字母相同者表示差異不顯著。條狀圖上 I 為標準差。

圖 2 不同合板的中心翹曲

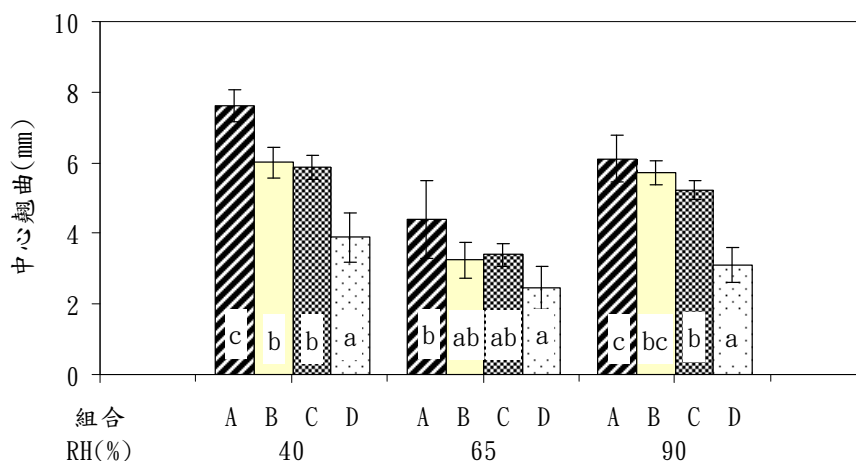


圖 3 三種相對濕度下的中心翹曲(附註如圖 2)

圖 3 為在三種相對溼度下不同合板的中心翹曲變化。由圖 3 顯示，在相對溼度 40%、65%和 90%下，都是以由 A 組為最大，D 組為最小，而 B 和 C 兩組居中且無顯著性的差異。在 A 組中層與層之間都有含水率差，所以有最大的翹曲量，而 D 組的所有單板都是在飽水狀態，單板之間沒有水分梯度，所以在乾燥平衡時，各層單板同時收縮，但因各層的收縮率並非均一，所以仍有些微翹曲量。

表 5 合板於三種相對濕度下之最大翹曲(mm)

合板	在 20°C 之相對溼度(%)		
	40	65	90
A	7.80B <sup>1</sup> c (0.87) <sup>2</sup>	5.23Ab (1.80)	6.23Ab (1.37)
B	6.20Bb (0.92)	3.88Aa (0.89)	5.81Bab (0.66)
C	6.42Cab (0.92)	4.09Aa (0.96)	5.41Bab (0.55)
D	5.33Ba (1.88)	3.77Aa (0.90)	4.83ABa (1.66)

1 英文字母為鄧肯(Duncan)多變域分析在顯著水準為 0.05 的檢定結果，大寫字母為同列間比較，而小寫字母為同行間比較，字母相同者表示差異不顯著。  
2 括弧內數字為標準差。

表 5 為合板在三種相對濕度下的最大翹曲。在 40% 之相對濕度下，各組的最大翹曲分佈在 5.33 至 7.80mm 之間；在 65% 之相對濕度下，各組的最大翹曲分佈在 3.77 至 5.23mm 之間；在 90%RH 下，各組的最大翹曲則分佈在 4.83 至 6.23mm。各組在不同相對濕度下的最大翹曲繪圖如圖 4。

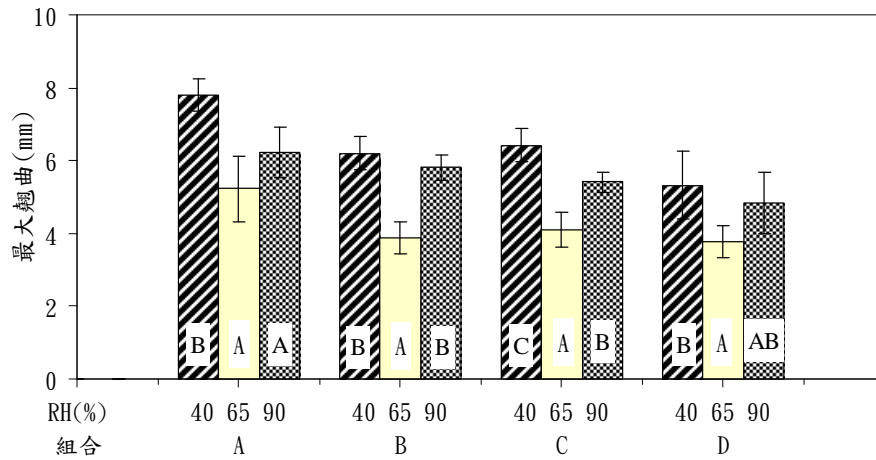


圖 4 不同合板的最大翹曲(附註如圖 2)

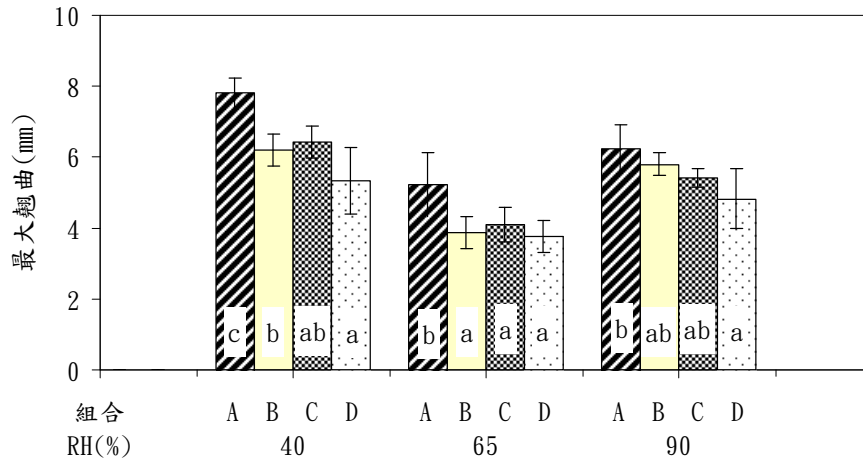


圖 5 三種相對濕度下的最大翹曲(附註如圖 2)

圖 5 顯示在三種相對濕度下各種合板的最大翹曲值。圖 4 與圖 2 相似均是以 65%RH 的翹曲較低，而 40%RH 之翹曲量為最高。而圖 5 所顯示在三種相對濕度，A 合板有最大值，而 D 合板有最小值，居中的 B 和 C 合板則無顯著的差異，此趨勢和圖 3 所示相同。

## 2. 有限元素之模擬

由以上試驗可知合板最後置入 20°C、65%RH 之平衡含水率為 12% 的狀態下所得到的翹曲較低，因此本試驗以 ANSYS 模擬 4 種合板在相對濕度為 65% 時的翹曲變化，結果列在表 6。

表 6 四種合板實際和預測之最大翹曲(mm)

合板	實際	預測
A	4.38	12.79
B	3.25	11.08
C	3.39	11.08
D	2.47	0.34E-2

由表 6 得知，A、B、C、D 的翹曲的實測值和預測值有相同的趨勢，都是以 A 合板為最大，D 組為最小，而 B 和 C 居中且沒有顯著的差異。但預測值比實測值大很多，這此差異可能是因為模擬所使用的材料性質與實際樹種不同所致，將來使用經過實測的材料性質進行模擬應可得較精確翹曲值。圖 6 所示為 A 合板在平衡時翹曲情形。

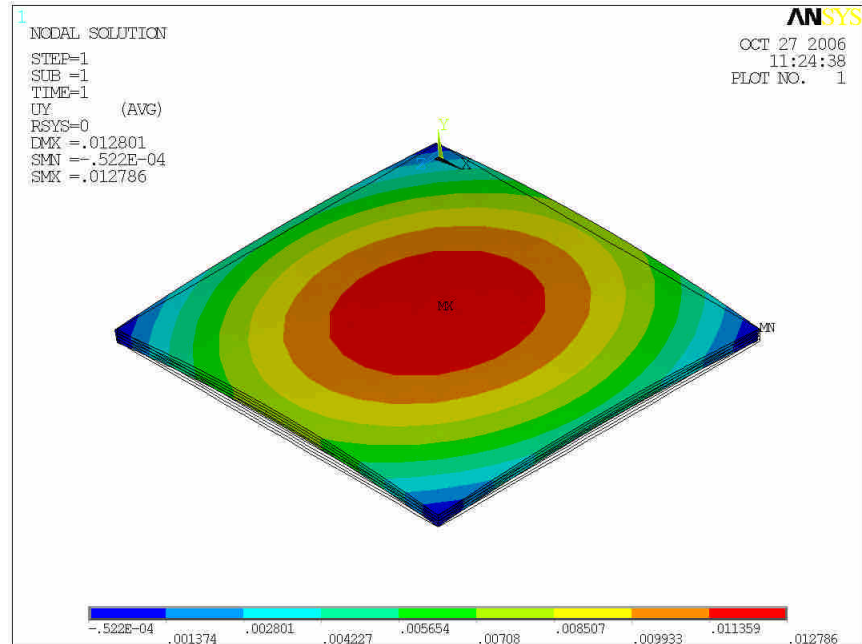


圖 6 合板 A 以 ANSYS 模擬的翹曲變形圖

#### IV. 結論

本研究是利用具有不同初始含水率的單板製造合板，再將其置於不同相對濕度下，以誘發翹曲，並記錄之，再與利用有限元素法模擬所得的預測翹曲值相比較。在實測結果方面，不論是中心或最大翹曲，其最終平衡含水率為 12% 時的翹曲為最低；而在平衡含水率達 8% 時有最高翹曲量。在相同的濕度下，實測及預測的中心翹曲及最大翹曲會隨著單板之間含水率差的增加而增加。

#### V. 參考文獻

1. Cai, Z. and J. R. Dickens (2004) Wood composite warping : modeling and simulation. Wood and Fiber Science 36(2):174-185.
2. Fridley, K. J. and R. C. Tang (1993) Modeling three-dimensional distortion of wood due to anisotropic shrinkage. Mathematical computer modeling 17(9):23-30.
3. Hsu, N. H. and R. C. Tang (1975) Distortion and internal stresses in lumber due to anisotropic shrinkage. Wood Science 7(4):299-307.
4. Johansson, M., M. Perstorper, R. Kligler, and G. Johansson (2001) Distortion of Norway spruce timber Part. 2:Modeling twist. Holz als Roh-und Werkstoff 59:155-162.
5. Johansson, M. and R. Kligler (2002) Influence of material characteristics on warp in Norway spruce studs. Wood and Fiber Science 34(2):325-336.
6. Johansson, M. (2003) Prediction of bow and crook in timber studs based on variation in longitudinal shrinkage. Wood and Fiber Science 35(3):445-455.
7. Kligler, R., M. Johansson, M. Perstorper, and G. Johansson (2003) Distortion of

- Norway spruce timber Part 3: Modeling bow and spring. Holz als Roh-und Werkstoff 61:241-250.
8. Perstorper, M., P. J. Pellicane, I. R. Kliger, and G. Johansson (1994) Quality of timber products from Norway spruce. Wood Science & Technology 29:339-352.
  9. Ormarsson, S., O. Dahlblom, and H. Petersson (1998) A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation Part 1: Theory. Wood Science and Technology 32 : 325-334.
  10. Ormarsson, S., O. Dahlblom, and H. Petersson (1999) A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation Part 2: Simulation of drying board. Wood Science and Technology 33:407-423.
  11. Ormarsson, S., O. Dahlblom, and H. Petersson (2000) A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation Part 3: Influence of ring orientation. Wood Science and Technology 34:207-219.
  12. Simpson, W.T. and T. D. Gerhardt (1984) Mechanism of crook development in lumber during drying. Wood and Fiber Science 16(4):523-536.
  13. Suchsland, O. and J. D. McNatt (1986) Computer simulation of laminated wood panel warping. Forest Products Journal 36(11/12): 6-23.
  14. Suchsland, O. (1990) Estimating the warping of veneered furniture panels. Forest Products Journal 40(9):39-43.
  15. Suchsland, O., Y. Feng and D. Xu (1994) The hygroscopic warping of laminated panels. Forest Products Journal 45(10):57-63.
  16. Tong, Y. and Suchsland, O. (1993) Application of finite element analysis to panel warping. Holz als Roh-und Werkstoff 51:55-57.

## VI、計畫成果自評

本研究內容符合原計畫，並達成其目標，研究結果顯示可利用先設含水率的單板製成合板再予以乾燥以引發翹曲變形。而有限元素法的利用可以預估具有水份梯度的合板的變形，預測翹曲與實際翹曲有相同的趨勢，但預測值因為所輸入的材料性質不是實測值，所以會有誤差。另外本實驗的先設單板含水率為假想的水份梯度，如能預估出真實的水份梯度，則預測將更為完善。