

研究報告

台灣古蹟福州杉使用百年後之物理性質

林仁政 洪國榮¹

【摘要】 本研究乃評估台灣傳統建築之老舊福州杉木材使用百年後之物理特性，提供日後木質文物保存之參考。經室外暴露試驗一個月後，老舊福州杉楹材之顏色安定性較健全材為佳。以掃描式電子顯微鏡（SEM）觀察風化表面，結果發現管胞及木質線薄壁細胞已嚴重破壞而喪失其形貌，其中木質線薄壁細胞為弦向組織破壞之起始點；而老舊表面之管胞壁則產生不規則裂縫居多。風化材及老舊材之吸水率（25 °C 蒸餾水浸漬 24 小時）和徑向厚度膨潤率（40 °C、90 % 相對濕度下調濕 72 小時）均較健全材為高，顯示木材風化及老化作用將影響其尺寸安定性。當木材受腐朽或表面存有老舊彩繪塗料時，尺寸不安定性更甚於風化材及老舊材。

【關鍵字】 木質文物、風化材、老舊材、吸濕性、尺寸安定性、掃描式電子顯微鏡

Research paper

Physical Properties over 100-year-old China Fir Wood of Historic Monuments in Taiwan

Jen-cheng Lin Kuo-jung Hong¹

【Abstract】 The purpose of this study was to estimate the physical properties of an over 100-year-old China fir wood from aged construction in Taiwanese traditional buildings as a guide for the conservation of wood-based cultural relics. Obviously, the color stability of old china fir purlin wood was better than that of sound one after one-month outdoor exposure. The tracheid and ray parenchyma for weathered woods were severely damaged by SEM observation, it led to a cell appearance loss to some extents, and these checks occurred in the ray parenchyma tissue as their starting points on the tangential surface. On the old purlin woods surface, the irregular slit on tracheid wall was found. The water absorption(%) (specimens dipped into distilled water at 25°C for 24 hours) and thickness swelling in radial(%) (specimens exposing under 40°C and 90% R. H. for 72 hours) of weathered wood and old wood were higher than sound wood, and the highest dimensional unstability was obtained when wood specimens decay or containing the polychromes above wood surface.

【Key words】 Wood-based cultural relics, Weathered wood, Old wood, Hygroscopic property, Dimensional stability, Scanning electron microscope (SEM).

1. 國立中興大學森林學系博士班研究生、教授
PH.D. Graduate student and Professor, Department of Forestry, NCHU.

一、前言

歲月能夠讓一棟建築歷經滄桑，因風雨之侵蝕而損壞，而保存一棟建築物與保存一件古物或古畫是不同的，建築物的體型較為龐大，佔有一定的面積，並與周遭環境聯成一系列的歷史與人文背景；再者建築物無法被收藏起來，所以皆暴露在大自然的無情侵蝕之下，而逐漸衰老敗壞。

台灣許多的古蹟或傳統歷史建物均以木構造為主要體系，目前所保存的古蹟建築就有 60 % 屬於木結構體，諸如廟宇、宗祠、古厝等大都從清朝或日治時期保存至今。自清中葉開始，台灣早期許多重要的木構建築皆自中國大陸進口福州杉作為建築材料，歷經百年來歲月的淬煉，已明顯受到氣候與生物因子的危害而遭受劣化（林仁政等，2001；林仁政，2002(b)；福田清春，2000）。

這些建材具有歷史、人文、藝術與技藝價值必須妥善的保存下來，即使汰換或重建也必須被保存下來，可作為日後修建、典藏與研究之用（奚三彩，1999；陳允適等，1995；張婉真，1997），因此老舊木材的保存亦為文化資產保存的另一延伸。任何的物品皆有其使用壽命，尤其建材暴露在大氣環境下，皆會受環境因子的影響，而呈現不同的劣化特徵（林維明，1995）。或者遭逢大地震時，重要建材與文物埋沒於瓦礫土堆中，造成形體與外貌嚴重破壞。

木材暴露在天候環境下隨時遭受風化、腐朽、蟲蛀之危害，其中風化主要是光線（紫外光、可見光、紅外光）、水分（露水、酸雨、雪、濕度）、溫度和氧氣的綜合作用所產生，其中太陽光中的紫外光所形成的光劣化（photodegradation）將嚴重影響木材的化學及機械性質（Evans, 1992）；經過風化的木材在外觀、光澤度（gross）、粗糙度（roughness）、硬度（hardness）、耐磨性均發生改變，同時木材的化學成分纖維素、半纖維素及木質素和部

分抽出成分皆會受到天候的影響產生不同程度的劣化與破壞（張上鎮，1983；Evans *et al.*, 1992；Evans *et al.*, 1988；Evans *et al.*, 2002）。蟲害之中以白蟻危害最為嚴重，白蟻是建築物損壞的最大害蟲，短時間內蛀蝕木材最為顯著，造成結構體的崩塌；而木材腐朽菌一旦侵入木材，菌絲分泌的酵素會分解木材纖維和木質素，破壞木材組織而使木材腐朽；變色菌的污染易使木材變成綠色、褐色、或青灰色。白蟻的危害主要是由木材內部啃食，腐朽則是從木材表面腐蝕。

木材若長期暴露在太陽光下，顏色將由黃褐色轉為灰白色，並形成凹凸不平的波浪狀表面（Williams, 1987）。紫外光照射及雨水的雙重作用，造成木材抽出成分及具疏水性的木質素降解並被淋溶洗出。具高膨潤性之抽出成分被移除後，不規則收縮明顯增大，尺寸不安定性將增大（Choong, 1969）；張上鎮教授曾研究發現，使用 100 年後之福州杉魚鱗板受風化作用影響，木材管胞壁上的重紋孔（bordered pit）及木質線薄壁細胞（ray parenchyma）均受到嚴重破壞（張上鎮，1985）。

木材暴露在大氣環境下，細胞長期反覆收縮與膨脹而導致劣化，易受大氣中水分變動的影響，使得吸水及膨潤性增大（林仁政等，2002(a)）。此外，地理位置、建物周遭環境、座落方位皆會影響木質建材之劣化，不同的劣化程度影響木材日後之保存性。因此本實驗乃分析老舊福州杉建材不同劣化表面之物理特性，以期了解木材劣化後之特性，提供日後老舊建材相關保存環境之參考。

二、材料與方法

（一）試材製備

試驗材料乃收集自民國八十八年九二一大地震後之震損材料，取材構件與部位如表 1 所示（取樣皆以邊材為主）。依據 CNS6715-02025 製成 3(L)×3(W)×0.5(T)cm 之標準尺

表 1. 試材之基本性質
Table 1. Fundamental properties of specimens.

霧峰林宅 宮保第	斷代(年)	表面特性	平均 年輪寬(mm)	比重	氣乾 含水率(%)
第一進右次間二縫 柱 (363cm(L)、26cm(ϕ)) 【坐東朝西】	118 ⁽¹⁾ (1883-2001)	風化材 彩繪剝落材 附壁材 健全材	2.8	0.47	12.3
霧峰林宅 宮保第 五落右護龍次間 楹 (350cm(L)、15cm(ϕ))	107 ⁽¹⁾ (1894-2001)	老舊材 健全材	1.5	0.38	12.2
霧峰林宅 大花廳 二進右護龍 中脊楹 (363cm(L)、28cm(ϕ))	107 ⁽¹⁾ (1894-2001)	老舊材 健全材 腐朽材	3.1	0.41	12.2
大里林大有宅第 拜亭 柱 (355cm(L)、24cm(ϕ)) 【坐北朝南】	113 ⁽²⁾ (1888-2001)	風化材 老舊材 健全材	2.4	0.50	11.7
大里林大有宅第 拜亭三架楹 (458cm(L)、20cm(ϕ))	113 ⁽²⁾ (1888-2001)	老舊材 彩繪材 健全材	3.0	0.40	12.2
惠蓀林場 (981cm(L)、24cm(ϕ))	—	現代木材	4.8	0.42	15.6

⁽¹⁾許文彬 1997 台中縣大屯區古蹟巡禮暨史料彙編 台中縣立文化中心出版

⁽²⁾中縣文獻第七期—文化資產之研究發展與回顧 1999 台中縣政府出版

寸，以環氧樹脂 (Epoxy resin) 作封面處理，僅留木材劣化面 (如圖 1 所示)，於氣乾狀態下放置一個星期，作為吸濕及吸水試體。

其中試體中所敘述之風化材 (weathered wood) 乃指福州杉木材表面暴露在太陽光及雨水環境下之材料 (受到天候劣化)，彩繪剝落材 (polychromy peeled wood) 為早期經「披麻捉灰」工法之彩繪層，受天候的影響而

剝落之木材表面 (短時間天候劣化)，附壁材為柱體埋入土塊之部位 (未受到天候劣化)；老舊材 (old wood) 為位處室內之楹材暴露在空氣下所遭受的老化，彩繪材 (polychrome wood) 專指含老舊彩繪塗料層之木材。而健全材 (sound wood) 為劣化材木材內部 3 cm 處之部位，現代木材 (modern wood) 則取自中興大學惠蓀實驗林場 30 年生

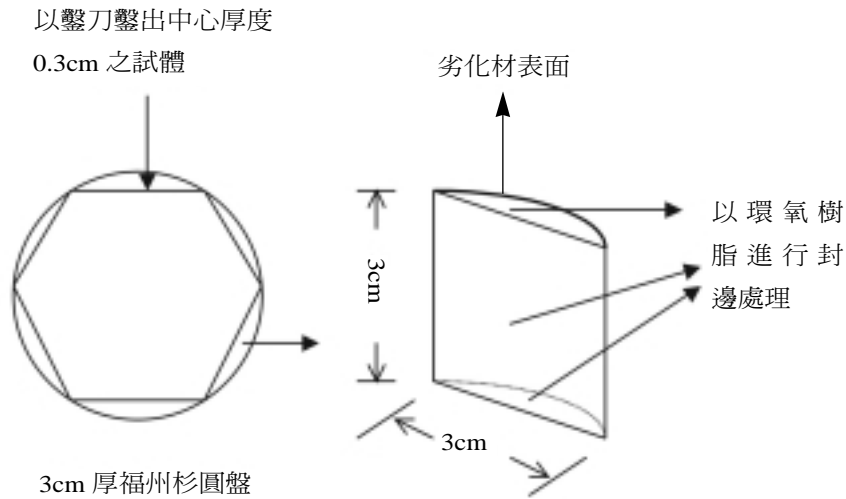


圖 1. 試體之製備

Fig. 1. Preparation of specimens.

之福州杉木材。

(二) 試驗方法

1. 天然暴露試驗

老舊楹材 (5(w)×20(w)×0.5(T)cm) 以空氣壓縮機微量空氣輕噴木材表面，以除去表面塵土，測定木材顏色 (如下所述)，將試體擺放於中興大學森林研究所四樓頂樓耐候試驗架中 (台中市)，面向南方成 45°，進行天然暴露試驗一個月，試驗期間每隔 3 天測定顏色變化。

2. 擦拭處理

老舊材表面分別以蒸餾水及酒精 (70 % 濃度)，以棉花來回擦拭三次，去除表面塵土，於大氣環境下放置 24 hr 後，測定其表面顏色變化。

3. 劣化層分析

將風化材及老舊材表面以手壓鉋機鉋削處理，鉋削厚度控制在 15 μm，逐次往木材內部鉋削，逐層測量木材之顏色變化。

(三) 評估

1. 顏色變化

將試材以色差計 (CR-200) 測定其顏色變化，並可經由色差值 ΔE^* 的大小來判斷其顏色變化。顏色的變化是以國際照明委員會 (Commission International del' Eclairage ; CIE) 於 1976 推薦之 CIE 所建立之 L^* 、 a^* 、 b^* 值 (表色體系) 來表示顏色差異之方法。 L^* 表色之明度 (Light)，完全白色為 100，絕對黑為 0； $+a^*$ 表示為紅色， $-a^*$ 表示為綠色， a^* 值越大表示越偏向紅色，負值越大顏色越偏向綠色； $+b^*$ 代表黃色， $-b^*$ 為藍色的代表。

色差值 (ΔE^*) 的計算式如下：

$$\Delta E^* = \{[(L^*t - L^*c)^2 + (a^*t - a^*c)^2 + (b^*t - b^*c)^2]\}^{1/2}$$

L^*c 、 a^*c 、 b^*c ：暴露試驗前之 L^* 、 a^* 、 b^* 值

L^*t 、 a^*t 、 b^*t ：暴露試驗後之 L^* 、 a^* 、 b^* 值

2. 吸水試驗 (CNS-6714-02024)

經環氧樹脂封膠處理之絕乾試體浸漬在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 蒸餾水中 24 hr，取出稱其重量，隨後於氣乾下每隔 3 小時量測其重量，計算試

體吸水與脫水情形。

3.吸濕試驗 (CNS-6715-02025)

將上述已封邊處理之試體，分別放置在 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相對濕度為 $75 \pm 2\%$ 之恆溫恆濕機至試體重量不變，秤取重量。再將試體移至 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相對濕度為 $90 \pm 2\%$ 之恆溫恆濕機中，經 6、24、72 小時調濕後秤其重量，最後再將吸濕試體置入 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 烘箱中，乾燥至重量不變為止，秤其試體之絕乾重量。此外，將絕乾試體分別放置於 40°C 、相對濕度從 30% 至 90% 之恆溫恆濕機中，相對濕度間隔 5%，共計 13 種相對濕度，分別計算試體於不同相對濕度下之含水率變化。試體含水率計算式如下所示：

$$U_{75}(\%) = \frac{W_a - W_o}{W_o} \times 100$$

$$U_{90}(\%) = \frac{W_b - W_o}{W_o} \times 100$$

$$\alpha\% = \frac{Lr(LT) - lr(lT)}{lr(lT)} \times \frac{W_o}{W_b - W_a}$$

$U_{75}(\%)$: 40°C 、75% R. H.之溫濕度條件下之試體平衡含水率(%)

$U_{90}(\%)$: 40°C 、90% R. H.之溫濕度條件下之試體平衡含水率(%)

$\alpha\%$: 含水率每增加 1% 時之試體平均膨潤率(%)

W_a : 40°C 、75% R. H.之溫濕度條件下之試體重量(g)

W_b : 40°C 、90% R. H.之溫濕度條件下之試體重量(g)

W_o : 絕乾重量(g)

$lR(lT)$: 40°C 、75% R. H.之溫濕度條件下達平衡狀態之徑向(或弦向)長度(mm)

$Lr(LT)$: 40°C 、90% R. H.之溫濕度條件下達平衡狀態之徑向(或弦向)長度(mm)

4.掃描式電子顯微鏡觀察

將觀察試體充分乾燥後，以雙面膠帶將樣品固定於鋁質載台上，使用離子濺鍍器鍍上一層金膜，隨後置入 20 kV 加速電壓之掃描式電子顯微鏡 (Scanning electron microscope, SEM: HITACH, S-2400型) 下進行試體顯微形態之觀察及照相。

三、結果與討論

(一) 天然暴露試驗

老舊材經天然暴露試驗後之顏色變化，如圖 2 所示。宮保第檣材、大花廳中脊檣材與大里拜亭檣材經天然暴露試驗 30 天後 ΔE^* 值明顯低於健全材 (sound wood)， ΔE^* 值愈小表

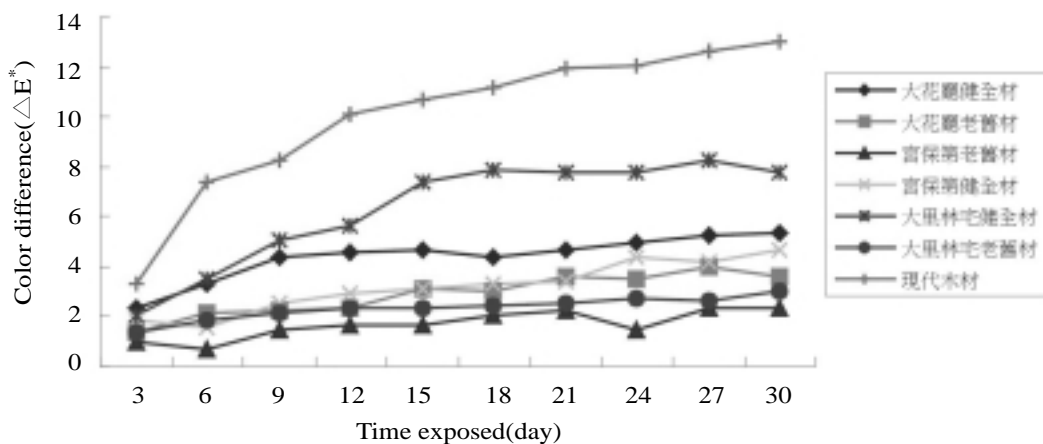


圖 2. 老舊材經天然風化試驗後之顏色變化

Fig. 2. Changes in Color of old wood after natural weathering test.

示顏色變化愈小，老舊材 ΔE^* 值由小至大依序為宮保第楹材、大里楹材、大花廳中脊楹。這顯示老舊材料具有較高的顏色安定性；而現代木材 (modern wood) ΔE^* 值顯著高於老舊材與健全材，表示新鮮材表面顏色易受天候影響而改變。

本實驗所取用的老舊材，皆為百年以上建材，受到室內光線劣化與氧化作用而逐漸老化，顏色均較健全材深，呈現暗褐色或深褐色，顏色加深主要是木材表面的木質素受到光氧化 (photo-oxidation) 作用降解，木質素原來的苯醌類官能基 (phenolic hydroxyl groups) 氧化成為 quinones 的有色裂解物，同時產生許多水溶性低分子量的羰基 (carbonyl groups) 與苯醌共軛結合之裂解物。形成含有羰基的劣化衍生物，再加上部分水溶性抽出成分水解，導致木材表面由黃轉為褐色 (張上鎮, 1983; 張上鎮等, 1997; Evans *et al.*, 1992; Hon *et al.*, 1984)。圖 3 為老舊材經天然暴露試驗後之黃色指數差值 (ΔYI)，結果發現所有木構件老舊材表面黃色指數低於健全材，顯示老舊材表面有較佳之顏色安定

性。

(二) 擦拭對老舊材顏色之影響

木材暴露在大氣環境中不外乎受到腐朽、風化、蟲蛀、髒污(灰塵、油煙泥土、斑點)、金屬鏽蝕、鹽類等的危害。許多遺留下來的文物，表面常常附有「灰塵」、「塵垢」、「油煙」、「斑點」、「泥」、「金屬鏽」、「地衣類」、「鹽類」等 (青木繁夫, 2000; 三輪嘉六, 2000)。以酒精與蒸餾水簡易擦拭木材表面，評估擦拭對木材表面顏色之影響，由表中可以清楚地發現，以蒸餾水擦拭者 ΔE^* 值分別為宮保第楹材 1.39、大花廳楹材 3.68、大里楹材 3.86，而酒精擦拭者宮保第楹材 0.51、大花廳楹材 1.26、大里楹材 2.81 (表 2)；因此得知老舊材經酒精擦拭後之顏色變化均較蒸餾水擦拭者為低。顯示酒精擦拭處理對老舊材顏色影響較少。可能為酒精在擦拭過程中揮發速度較快，不易滲透至木材表面，而水分乾燥速度較慢，大量被木材表面 (使用百年後已產生微細裂痕) 所吸收，溶出已遭裂解水溶性低分子產物，而沉積於木材表面，造成顏色變化增大。

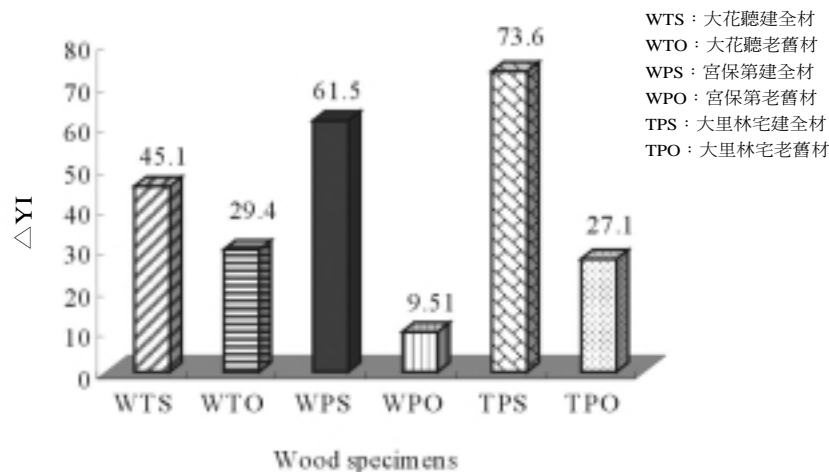


圖 3. 老舊材經天然風化試驗後之黃色指數差值

Fig. 3. The ΔYI values of old woods after natural weathering test.

表 2. 擦拭處理對老舊材表面顏色之影響

Table 2. Influences of wipe treatment on surface color of old wood.

木構件	溶劑	擦拭前			擦拭後			ΔE^*
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	
霧峰林宅宮保第 楹	酒精	34.07	3.64	8.06	33.65	3.68	8.33	0.51
	蒸餾水	31.94	3.45	5.33	30.69	3.68	5.75	1.39
霧峰林宅大花廳 中脊楹	酒精	40.02	5.92	9.49	39.66	6.01	10.37	1.26
	蒸餾水	39.49	5.54	8.24	36.93	6.86	9.92	3.68
大里林宅 楹	酒精	42.33	5.57	12.60	40.32	6.55	14.21	2.81
	蒸餾水	41.10	5.97	12.36	39.45	7.62	15.29	3.86

(三) 表面組織變化

由於木材表面組織差異性，天候造成之木材腐蝕和乾裂現象不盡相同，而增大木材表面的凹凸性與粗糙性。一般針葉樹材易成波浪狀，主要是春秋材密度不同而有不同的腐蝕率，而闊葉樹材因無明顯的春秋材轉變，故腐蝕情形較均一，其腐蝕率類似針葉樹材的秋材部，但隨樹種不同而有明顯的差異。木材使用一段時間後，不論風化或老舊表面均會產生或大或小不規則裂縫，當木材發生開裂後，將成為白蟻入侵之管道，於是白蟻將土補於開裂處避免光線射入，築巢啃食木材至完全解體。因此木材之開裂成為白蟻入侵之途徑。木材的劣化程度與構件位置、方位等有密切性之關聯，日照時間與暴露量亦會影響木材劣化，根據天候環境與地理位置不同，木材風化的種類可分為下列三種：

1. 當木材曝曬面為南向時，日光充足且日照時間長，木材若被雨水浸濕後迅速被日光照射而蒸發，時間一久表面逐漸從黃褐色轉為灰白色，秋材帶明顯凸出，而春材帶因天候剝蝕而下陷，表面硬度較健全材為高，如大里林宅拜亭柱材和彰化秀水益源古厝大門柱材（圖 4-B、圖 6）。若天雨影響頻率高，表面顏色則較上述風化面為深（如圖 4-A）。

2. 太陽光曝曬量較少時（非南面或西曬面），木材受潮後蒸發速度較慢，長期反覆作用導致木材纖維剝離、翹起及鬆軟，除產生細微龜裂外，木材腐朽也伴隨發生（圖 7-A）。若木材風化作用嚴重，表面將形成不規則開裂（裂深直達木材髓心），如宮保第後落福州杉柱材長年受到西曬的影響，明顯縱向開裂，雖經塗裝保護處理，然太陽光照射迫使塗料層劣化剝落，無法長期有效地保護木材（如圖 5 所示）。

(四) 表面層顏色

將風化材表面以手壓鉋機鉋削處理，鉋削量控制在 $15 \mu m$ ，並依序測量各層之顏色，同時換算 ΔE^* 值變化，其結果如圖 8 所示。由圖可清楚看出宮保第柱材之 ΔE^* 值變化至木材內部 $105 \mu m$ 處逐漸趨於穩定，而大里林宅柱材於 $45 \mu m$ 處 ΔE^* 值漸趨於平穩，顯示霧峰林宅柱材之劣化層深度大於大里林宅柱材。由表面層的顏色變化可得知木材之劣化層深度，嚴重風化之木材劣化層深度相對較高。

圖 7-A、C、E 和圖 7-B、D、F 分別為宮保第柱材和大里林宅柱材之巨觀及微觀組織變化，由圖發現霧峰林宅之弦向管胞壁嚴重開裂及破壞，並喪失原有細胞型態，而大里林宅之管胞壁輕微折斷、扭曲和變形，破損程度小於

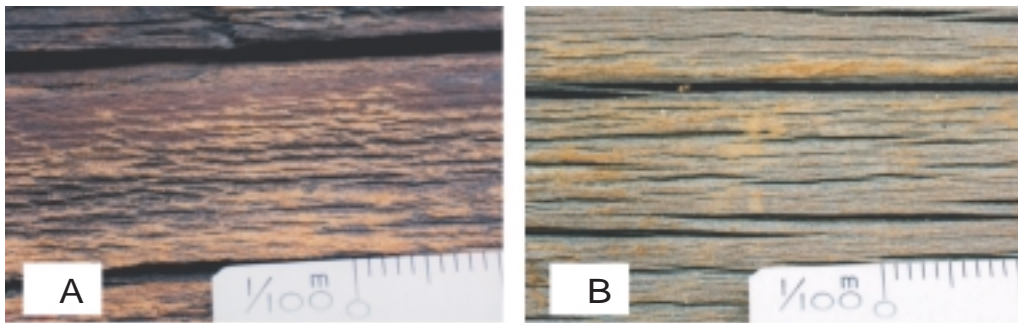


圖 4. 大里林宅福州杉柱材之風化面 A：日曬貧乏面、B：日曬充足面

Fig. 4. Weathering surface of China fir wood column of the Lin old homestead at Ta-li.

A : Sunlight insufficient ; B : Sunlight sufficient.



圖 5. 霧峰林宅宮保第福州杉柱材表面裂縫

Fig. 5. Surface split of China fir wood column of Kung-pao-ti of the Lin old homestead at Wu-feng.



圖 6. 彰化益源古厝大門福州杉柱材表面開裂

Fig. 6. Surface check of China fir wood column of the I-yuan old homestead in Chang-hua.

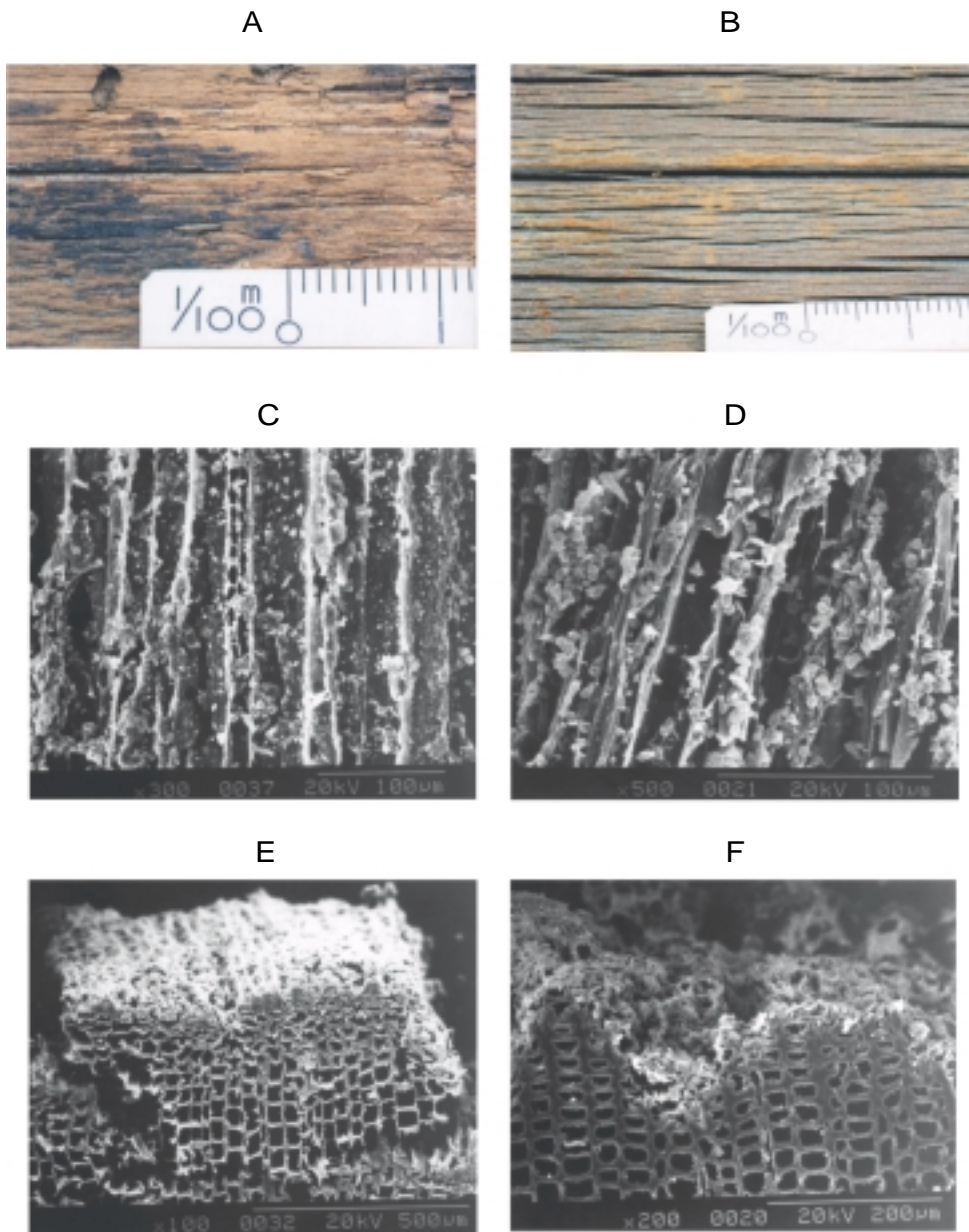


圖 7. 福州杉風化材之 SEM 圖

A、C、E為霧峰林宅宮保第柱材，B、D、F為大里林宅柱材

A、B：柱材表面，C、D：弦切面，E、F：橫切面

Fig. 7. SEM-photomicrograph of China fir weathered wood.

A、C、E：Wood column of Kung-pao-ti of the Lin old homestead at Wu-feng.

B、D、F：Wood column of the Lin old homestead at Ta-li.

A、B：Surface on wood column, C、D：Tangential section, E、F：Cross section.

霧峰林宅柱材（圖 7-C、D）。再者，觀察試體橫斷面 SEM 圖，大里林宅細胞組織破壞較少，僅產生風化腐蝕不均之波浪表面，表面產生疑似融溶現象；而霧峰林宅柱材風化極為嚴重，細胞明顯不規則開裂和細胞損失（圖 7-E、F），細胞開裂深度較大里林宅柱材為深，這顯示霧峰林宅柱材風化程度較大里林宅柱材嚴重，此現象與上述之表面層顏色變化結果相同。

木材長時間暴露在風雨環境下而逐漸風化，首先木材產生褐色的風化層，一段時間後變為灰白色，風化層經過顯微解析觀察可得兩種不同顏色及狀態之劣化層，最外層為灰白色之劣化殘餘層，內層為細胞較為完整之褐色層（矢田茂樹等，1995）。圖 8 中 A 和 A1 區域分別為宮保第柱材和大里林宅柱材灰白色劣化殘餘帶，而 B、B1 則為細胞褐色帶。由圖可明顯看出宮保第柱材之 A 區域深度低於大里林宅之 A1 區，同時 B 區域範圍亦高於 B1 區域。一般而言，可見光可進入到木材表面 2540 μm ，其中灰色層約為 125 μm ，

褐色層則在灰色層之下，深度約 508~2540 μm 間（Hon, *et al.*, 1986）。

木材顏色改變主要與細胞壁中膠層的木質素受到紫外光劣化後而引起一系列化學變色有關；此外空氣中飛來含有鐵成分的塵埃與木質素作用而產生黑變現象，亦是變色之影響因子。木材風化後，表面變色層轉而不穩定，吸濕與乾燥之反覆作用而產生開裂，應力不均，造成木材內部開裂逐漸增大。木材表面劣化後，表面性質變得較脆弱，雨水、冰雪、塵埃之機械磨耗作用，而殘留木材較硬的部分形成年輪凸起的現象，而產生凸起木理（raised grain），年輪強度逐漸損失，最後木材發生破碎直到完全解體為止。

圖 9 為老舊材表面層之顏色變化，試體各層顏色趨於穩定之深度依序分別為宮保第楹材 120 μm 、大里林宅楹材 105 μm 、大花廳中脊楹 60 μm ，楹材雖未遭受風化，然大氣環境存在的水氣與氧氣，亦間接造成木材老化，部分抽出成分的裂解影響了木材表面顏色，水氣中的灰塵污染木材表面，左右了

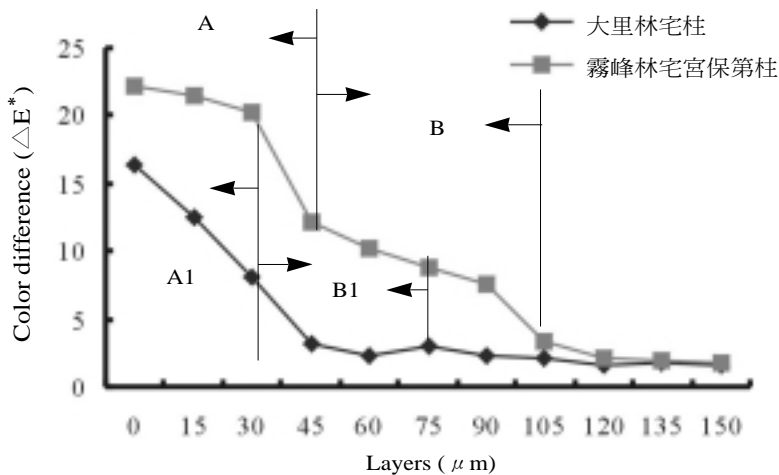


圖 8. 風化材表面層至中心層之顏色變化

A、A1：灰色層，B、B1：褐色層

Fig. 8. Changes in color of weathered woods measured from surface layer to internal layer.

A、A1：Gray color layer，B、B1：brown color layer

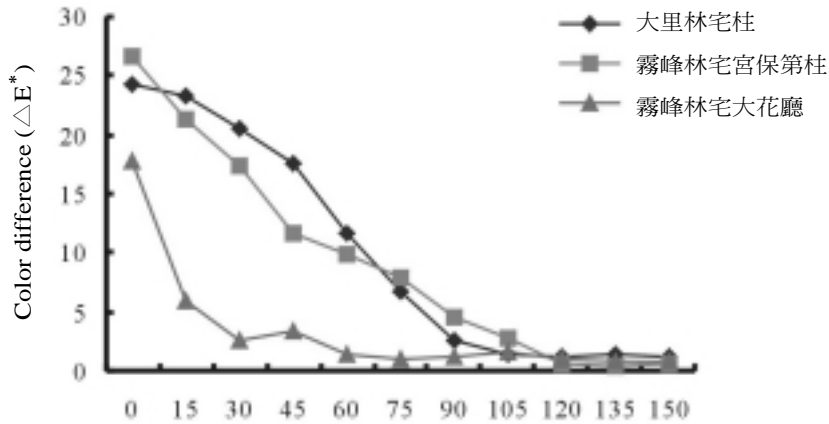


圖 9. 老舊材表面層至中心層之顏色變化

Fig. 9. Changes in color of old woods measured from surface layer to internal layer.

木材之顏色變化。根據中國大陸文獻記載，福州杉木材使用百年後顏色逐漸轉為褐色或深褐色，因此福州杉（杉木）又稱為「烏杉」（陳允適等，1995）。

宮保第老舊材表面木材細胞壁劣化 SEM 圖如圖 10 至圖 12 所示，由圖發現管胞壁上產生不規則開裂及細胞破損現象，並失去原有形狀。楹材為長圓柱體，暴露面為弦向面，因此木材細胞破壞木質線薄壁細胞最明顯，而管胞為厚壁細胞天候劣化抵抗高於薄壁細胞。木質線薄壁細胞間之中膠層（middle layer）被破壞，造成薄壁細胞間明顯破裂與分離（箭頭處），並喪失原有型態。因此木材長年受到濕氣、氧氣的反覆作用，造成木材細胞壁破壞，細胞壁劣化已影響木材對水分的抵抗效能。以針葉樹而言，其組織大部分由管胞所構成，管胞為厚壁細胞較木質線的薄壁細胞對天候劣化有較佳之抵抗，故木質線薄壁細胞是木材弦向面細胞破壞之先趨。此外，百年建築大都欠缺管理與維護，建築材料隨時受大氣中灰塵或髒污水氣影響，木材管胞壁常附著許多污染物。

(五) 吸水性

圖 14 至圖 17 為木材浸漬於 25 °C 蒸餾水 24 hr 後之吸水率變化，隨後每隔 3 hr 評估木材間之脫水情形。宮保第柱材之吸、脫水性質如圖 14 所示，由圖可清楚發現風化材吸水率最高、其次為附壁材，現代木材與彩繪剝落材差異不大，健全材最低；大里林宅柱材吸水率以風化材，其次為背曬材，最低為健全材和現代木材（圖 15）。由以上的結果得知風化材容易吸水，由於吸水率增大，相對地脫水時間則延長，木材飽水的時間相對增大，將促進木材劣化，同時也可能提供微生物或昆蟲侵蝕的機會。

圖 16 為大花廳中脊楹材之吸水與脫水情形，老舊材吸水率最高，脫水速度極快，腐朽材容易吸水且脫水速度極為緩慢，顯示木材腐朽後容易吸水且不易散去，健全材吸水率最低，在氣乾 9 hr 後便達氣乾含水率（14~16 %）。木材遭受蟲菌危害後，含水率變化比健全材為高，特別是腐朽材，在短時間內可以吸收大量水分，木材腐朽越厲害，這種性質表現越明顯。腐朽材的收縮與膨脹過程異於健全材，在腐朽材的收縮過程中，往往出現典型的

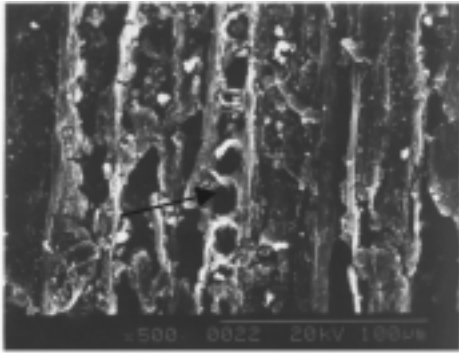


圖 10. 宮保第楹老舊材之 SEM 圖

Fig. 10. SEM-photomicrograph of old purlin wood of the Kung-pao-ti of the Lin old homestead at Wu-feng.

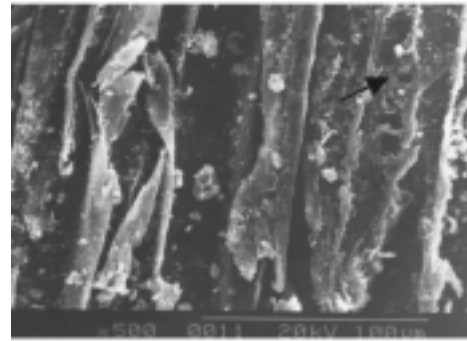


圖 12. 大里林宅楹老舊材之 SEM 圖

Fig. 12. SEM-photomicrograph of old purlin wood of the Lin old homestead at Ta-li.

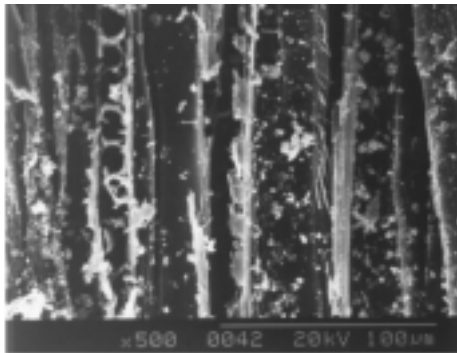


圖 11. 大花廳楹老舊材之 SEM 圖

Fig. 11. SEM-photomicrograph of old purlin wood of the Ta-hua-ting of the Lin old homestead at Wu-feng.

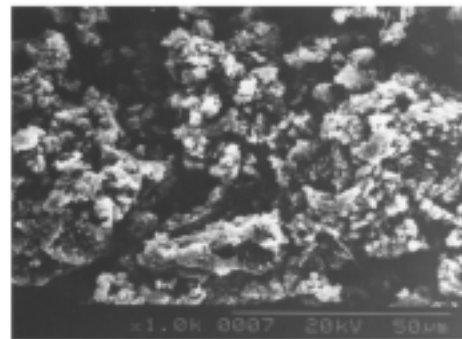


圖 13. 大里林宅楹彩繪層之 SEM 圖

Fig. 13. SEM-photomicrograph of Polychromatic layers above purlin of the Lin old homestead at Ta-li.

收縮裂痕。

大里楹材吸、脫水情形如圖 17 所示，彩繪材吸水率高達 120%，吸水率高於風化材與老舊材，顯示含彩繪層之試體，因塗料龜裂及老化而成爲易吸水材料（如圖 13 和圖 17 所示），其吸水率遠大於木材腐朽或風化部位。由以上結果發現，表面彩繪層大量吸水

將影響木材與彩繪層膠合面，進而產生不均的乾燥收縮應力，而加速彩繪層的脫落與破壞，這是值得注意的，尤其是含珍貴彩繪層之老舊木質建材保存，須避免天雨濺灑的機會。

從以上結果發現彩繪層容易吸水，其次爲風化材與老舊材，彩繪層吸水程度主要與

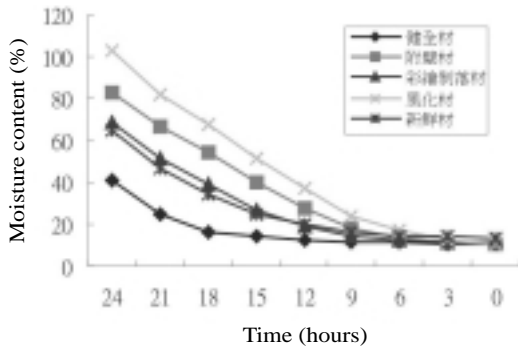


圖 14. 霧峰林宅宮保第柱材之脫水性
Fig. 14. Water desorption of wood column of Kung-pao-ti of the Lin old homestead at Wu-feng.

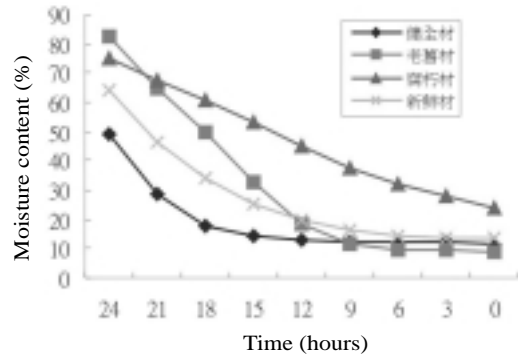


圖 16. 霧峰林宅大花廳中脊樑材之脫水性
Fig. 16. Water desorption of ridge wood of Ta-hua-ting of the Lin old homestead at Wu-feng.

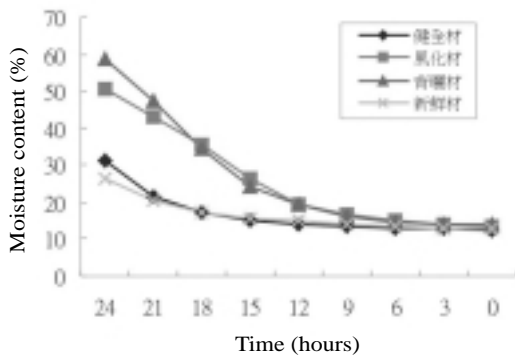


圖 15. 大里林宅柱材之脫水性
Fig. 15. Water desorption of wood column of the Lin old homestead at Ta-li.

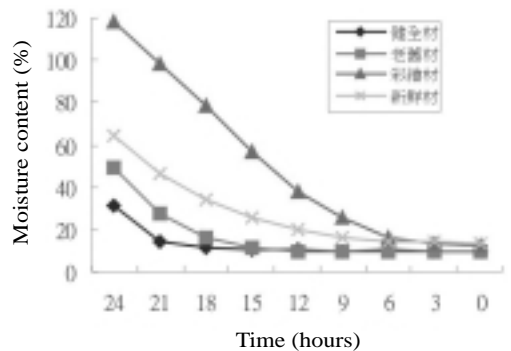


圖 17. 大里林宅樑材之脫水性
Fig. 17. Water desorption of purlin wood of the Lin old homestead at Ta-li.

塗料組成份有關，風化材及老舊材吸水量增大乃受到木材細胞壁破壞與抽出成分裂解所致。木材表面受光線、水分和溫度的綜合作用使得木材顏色產生變化，收縮與膨潤應力進一步造成巨觀到微觀的龜裂或開裂（圖 6A-F）（Debyshire, 1981；Evans *et al.*, 1988）。木材風化或老化後，水分易從細胞壁開裂處滲透至木

材內部，而增大水分吸收；另外一方面，存在於木材細胞腔內或沉積在細胞壁或紋孔口上的抽出成分，裂解後被移除，木材孔隙率增加，毛細管作用旺盛而增大吸水作用（Dorado *et al.*, 2001；Choong, 1969）。老舊材表面劣化雖不及風化材嚴重，然木材表面產生之微細開裂，水份易藉由毛細管作用而滲透到木材內

部，吸水率則明顯高於健全材。

(六) 尺寸安定性

表 3 為宮保第柱、宮保第楹及大花廳中

脊楹木材置於 40 °C、90 % 相對濕度環境下分別調濕 6、24、72 hr 後，含水率與徑向 (radial direction) 在含水率每增加 1 % 時之平

表 3. 調濕處理對霧峰林宅木材含水率與厚度膨潤率之影響

Table 3. Effects of conditioned treatment at different times on the moisture content and thickness swelling of wood specimens of the Lin old homestead at Wu-feng.

試體	條件	6 hrs ⁽¹⁾		24 hrs		72 hrs	
		Mc. (%)	α_R (%) ⁽²⁾	Mc. (%)	α_R (%)	Mc. (%)	α_R (%)
霧峰林宅宮保第 柱							
健全材		15.5	23.6 ^b 〔113.7〕 ⁽³⁾	18.0	22.9 ^b 〔43.1〕	18.7	24.1 ^b 〔38.4〕
附壁材		17.2	23.5 ^{b(4)} 〔93.1〕	20.7	21.1 ^b 〔37.5〕	20.6	24.9 ^b 〔80.2〕
風化材		14.4	42.2 ^a 〔155.9〕	16.9	45.2 ^a 〔180.7〕	17.6	46.8 ^a 〔71.1〕
彩繪剝落材		16.4	22.2 ^b 〔85.7〕	18.9	24.2 ^b 〔68.7〕	19.5	28.6 ^b 〔73.1〕
現代木材		12.7	29.8 ^b 〔32.4〕	15.4	29.5 ^b 〔21.8〕	16.5	25.9 ^b 〔12.6〕
霧峰林宅宮保第 楹							
健全材		13.9	57.9 ^a 〔281.5〕	17.6	44.2 ^a 〔163.9〕	18.8	32.7 ^{ab} 〔103.2〕
老舊材		14.5	57.1 ^a 〔766.9〕	17.9	42.3 ^a 〔171.6〕	18.9	39.2 ^a 〔118.1〕
現代木材		12.7	29.8 ^b 〔32.4〕	15.4	29.5 ^b 〔21.8〕	16.5	25.9 ^b 〔12.6〕
霧峰林宅大花廳 中脊楹							
健全材		15.8	20.1 ^b 〔123.2〕	17.3	22.9 ^b 〔156.3〕	17.8	26.5 ^b 〔125.8〕
老舊材		15.3	36.5 ^a 〔547.7〕	16.9	35.9 ^a 〔271.1〕	17.3	38.9 ^a 〔228.4〕
現代木材		12.7	29.8a ^b 〔32.4〕	15.4	29.5 ^b 〔21.8〕	16.5	25.9 ^b 〔12.6〕

⁽¹⁾ 40 °C、90 % R.H. 環境下之調濕時間

⁽²⁾ 試體徑向在含水率每增加 1 % 時之平均膨潤率 (α_R , %)

⁽³⁾ 變異係數 (coefficient of variation)

⁽⁴⁾ a, b, c,.....經 Duncan's New Multiple-Range (P=0.05) 統計後之結果，相同英文字母者表示數值間差異不顯著

均膨潤率 (α_R) 分析。宮保第柱材風化面之 α_R (%) 值顯著高於健全材、附壁材、彩繪剝落材、現代木材 (在 5 % 顯著水準下), 高相對濕度下風化材之水分膨潤性愈高。觀察試體之變異係數發現, 風化材之變異係數最高, 這說明了風化材試體間膨潤變異性增大, 此結果影響了整體柱材收縮與膨潤應力, 進而產生不規則開裂。

木材受天候的影響, 膨脹與收縮應力不均而產生裂隙, 進而形成較大的龜裂, 優美的木理隨之喪失、顏色改變、髒污及黴菌的聚集而喪失美觀, 表面組織纖維狀剝落, 微細碎片從木材表面漸層脫離與分解。

圖 18 為霧峰林宅宮保第柱材試體於不同相對濕度下 (40 °C) 之含水率變化, 由圖可以發現柱材風化面於不同相對濕度下之含水率皆低於健全材, 顯示風化材吸濕性較低, 而計算其厚度膨潤率則風化材大於健全材, 這說明了風化材單位吸濕厚度膨潤明顯增大, 如表 4 所示, 表 4 為試體吸濕率與厚度膨潤率之關係, 宮保第柱材之吸濕率 (40 °C、90 % R.H. 處理 72 小時) 分別為健全材 70.7、附壁材 83.8、風

化材 69.5、彩繪剝落材 73.7, 風化材與健全材之吸濕率差異不大, 而以 α_R 值除以吸濕率 (HA (%)), 結果發現數值分別為健全材 0.34、附壁材 0.30、風化材 0.68、彩繪剝落材 0.39, 數值愈大者表示木材極易被膨潤, 再再說明了風化後木材於高濕度下之高膨潤性, 此性質對未來重要老舊建材的保存評估, 扮演了極重要之角色。

宮保第柱材位於霧峰林宅第一進右次間二縫, 柱身一半的面積暴露在氣候環境, 遭受西曬而呈現風化, 另一半柱體則埋入土埆內, 由於年久失修, 屋頂長期漏水使得木材風化加速。而埋入土埆內之木材 (附壁材), 表面雖受壁體反覆潮氣影響, 然木材之厚度膨潤率與健全材差異不大 (表 4)。此外, 老舊木材若一直保存在高含水率狀態, 木材雖可保持原來型態, 然而這些老舊木材之乾燥收縮率大於健全材的 30 %, 主要是木材細胞與細胞間的結合已受到破壞所致。

宮保第楹材經 40 °C、90 % R. H. 調濕 6、24、72 hr 後, 老舊材與健全材 α_R 值無顯著差異 (表 4), 然而變異係數皆大於健全材, 顯示

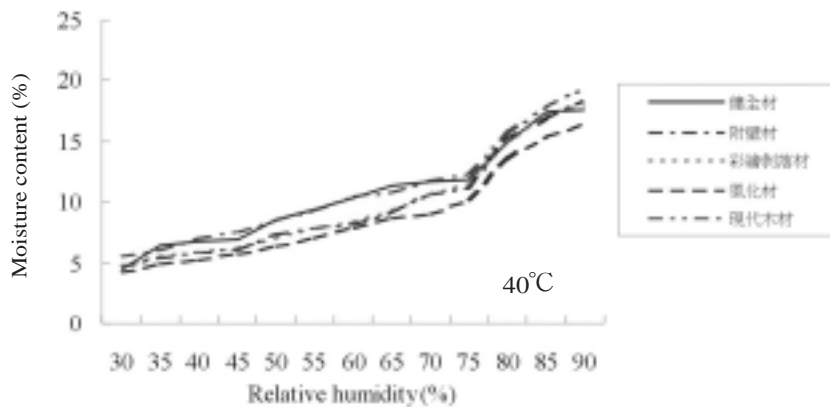


圖 18. 宮保第柱材在相對濕度 30 % - 90 % (40 °C) 條件下之含水率

Fig. 18. Moisture content of wood column combinations by moisture absorption from 30 % to 90 % R. H. at 40 °C in the Kung-pao-ti of the Lin old homestead at Wu-feng.

表 4. 木材經調濕後之吸濕性

Table 4. Hygroscopic properties of wood exposing under 40°C and 90 % R. H. for 72 hours.

木構件	試體	比重	HA (%) ⁽¹⁾	α_R (%) ⁽²⁾ / HA (%)
霧峰林宅	健全材	0.48	70.7 (5.6) ⁽³⁾	0.34
宮保第	附壁材		83.8 (132.3)	0.30
柱	風化材		69.5 (45.7)	0.68
	彩繪剝落材		73.7 (7.7)	0.39
霧峰林宅	健全材	0.38	73.1 (22.7)	0.45
宮保第 楹	老舊材		70.7 (5.1)	0.55
霧峰林宅	健全材	0.41	72.3 (3.2)	0.37
大花廳中脊楹	老舊材		71.3 (4.2)	0.55
大里林宅	健全材	0.50	69.5 (3.3)	0.41
	風化材		70.1 (6.1)	0.40
	背曬材		71.8 (99.5)	0.42
大里林宅	健全材	0.40	72.8 (13.1)	0.23
	老舊材		70.2 (13.4)	0.57
	彩繪材		95.1 (13.5)	0.81
惠蓀林場	現代木材	0.42	58.7 (9.6)	0.58

⁽¹⁾吸濕率 (humidity absorption, HA (%))

⁽²⁾試體含水率每增加 1 % 時之徑向平均膨潤率 (α_R , %)

⁽³⁾變異係數

木材老化後之膨潤變異性增大。調濕 72 小時後，以 α_R /HA 所得之數值 (0.55) 大於健全材 (0.45) (表 4)，顯示楹材吸濕後細胞壁受水分影響而明顯膨潤；試體經調濕 72 小時後，大花廳中脊楹材之老舊材 α_R 值 (38.9 %) 顯著高於健全材 (26.5 %) (5 % 顯著水準下)，健全材與現代木材無明顯差異，而計算 α_R /HA 之值發現，老舊材為 0.55、健全材為 0.37，顯示中脊楹木材膨潤性明顯增大，尺寸較不安定。大里林宅楹材之 α_R /HA 值，最高者為彩繪材 (0.81)、其次為老舊材 (0.57)，健全材 (0.23) 最低，彩繪層厚度膨潤明顯高於上述風化材及老舊材。綜合以上結果發現，楹材雖未受天候影響而產生風

化，但經年累月的老化作用，也逐漸降低其尺寸安定性。

Choong 教授曾研究抽出成分對南方松木材收縮率及吸濕性之影響，發現水溶性抽出成分 (water soluble extractives) 具膨潤細胞壁之效應，可提升木材尺寸安定性，且能降低木材之收縮率 (Bland, 1971; Choong, 1973; Hillis, 1986)。抽出成分乃除纖維素、半纖維素和木質素外之重要的成分，因此風化後之木材水溶性抽出成分被裂解，喪失膨潤細胞壁之作用，細胞壁被水分膨潤之機會相對增大。風化後木材中半纖維素中的木糖 (xylose) 與甘露糖 (mannose) 受水解而釋放出醋酸 (乙醯類被破壞)，醋酸含量增加造成木材表

面層 pH 值明顯下降 (Debyshire *et al.*, 1981; Hon *et al.*, 1986)。另外，木材受風化後羧基 (carboxyl groups) 和羰基 (carbonyl groups) 明顯增加，亦是木材膨潤增大之原因；木質素迅速劣化而失去木材細胞壁疏水特性 (Williams, 1991; Evans, 1992)，具吸濕性的纖維素和半纖維素含量相對地增加，再加上木材抽出成分的裂解，風化材的膨潤率則顯著提

高。

表 5 為大里林宅柱材於 40 °C、90 % 相對濕度環境下分別調濕 6、24、72 小時後之含水率與 α_R 值，由表得知風化材 α_R 值與健全材、背曬材、現代木材間無明顯差異，可能原因為柱材風化面為典型的南曬面，陽光日曬量大，嚴重天候劣化導致木材反覆地熱脹、冷縮，細胞疲乏而呈現乾縮 (不可逆)、僵化現

表 5. 調濕處理對大里林宅木材含水率與厚度膨潤率之影響

Table 5. Effects of conditioned treatment at different times on the moisture content and thickness swelling of wood specimens of the Lin old homestead at Ta-li.

條件 試體	6 hrs ⁽¹⁾		24 hrs		72 hrs	
	Mc. (%)	α_R (%)	Mc. (%)	α_R (%)	Mc. (%)	α_R (%)
大里林宅 柱						
健全材	13.5	37.2 ^{(2)a} [96.5] ⁽³⁾	16.0	30.4 ^a [98.8]	17.3	8.4 ^a [21.7]
風化材	13.4	37.3 ^{a(4)} [93.5]	15.9	30.9 ^a [48.7]	17.4	28.4 ^a [49.4]
背曬材	14.1	42.4 ^a [235.4]	16.8	30.7 ^a [131.0]	18.5	29.2 ^a [21.6]
現代木材	12.7	29.8 ^a [32.4]	15.4	29.5 ^a [21.8]	16.5	25.9 ^a [12.6]
大里林宅 楹						
健全材	12.8	18.9 ^c [180.1]	14.7	12.1 ^c [90.6]	17.2	17.2 ^d [137.2]
老舊材	13.7	43.7 ^b [741.8]	15.4	36.1 ^b [434.7]	16.2	39.8 ^b [320.8]
彩繪材	13.6	68.5 ^a [892.6]	15.1	70.5 ^a [725.7]	16.4	75.9 ^a [736.1]
現代木材	12.7	29.8 ^{bc} [32.4]	15.4	29.5 ^b [21.8]	16.5	25.9 ^c [12.6]

⁽¹⁾ 40 °C、90 % R.H. 環境下之調濕時間

⁽²⁾ 試體徑向在含水率每增加 1 % 時之平均膨潤率 (α_R , %)

⁽³⁾ 變異係數 (coefficient of variation)

⁽⁴⁾ a, b, c,.....經 Duncan's New Multiple-Range (P=0.05) 統計後之結果，相同英文字母者表示數值間差異不顯著

象，因此風化材的膨潤性不及霧峰林宅柱材明顯，由計算之 α_R 值、 α_R/HA 值可得到證明（表 4）。圖 19 為大里林宅柱材試體在不同相對濕度下（40 °C）之含水率變化，風化材於不同相對濕度下之含水率皆明顯低於健全材，其次為背曬材，健全材和現代木材則差異不大。顯示大里林宅風化材之吸濕性明顯低於健全材，厚度膨潤則與健全材無異（5 % 顯著水準下）。

另外一方面，觀察大里林宅柱材之比重（0.5）和平均年輪寬（2.4 mm）均高於其他材料，相對地木材細胞壁較厚，風化後春材（springwood）遭剝蝕而留下秋材（summerwood），木材表面硬度則相高於健全材；霧峰林宅柱材受天候影響表面組織已呈明顯鬆軟狀，有時纖維被剝離，甚至瓦解。風化面為西曬面，太陽光曝曬量相對少於大里林宅拜亭柱材之南曬面，再加上地震倒塌前屋頂漏水嚴重，木材表面被水分濺灑，表面已逐漸被微生物侵蝕，因此被風化程度遠大於大里林宅者。綜言之，日曬量、水分和

材料比重，均是造成木質建材劣化之重要影響因子，其中水份的存在將導致木材風化、腐朽、蟲害之要因（矢田茂樹，1995；Williams, 1987; Evans *et al.*, 1990; Hon, *et al.*, 1992）。

木材表面若經常暴露於水分改變快速的環境下，則易產生劣化，雨水或露水落於木材表面而快速地藉由毛細作用（capillary action）被表面層吸收，而進入到木材細胞壁內；水蒸氣則在高相對濕度下藉由擴散（diffusion）作用而被木材吸收，使得細胞壁被膨潤，表層與中心層的水分梯度（moisture gradients）變化，形成細胞壁的膨潤與收縮而導致應力產生。水分梯度越大，應力就越大，其中以表面層附近應力最大，不平衡的應力結果則發生乾裂與翹曲（Evans *et al.*, 1988）。Evans 教授（1990）研究發現歐洲椴木（European lime）受水解後，葡萄糖被多量裂解出來，這些葡萄糖主要是非結構多醣類（游離糖類、澱粉）或半纖維素中水解所產生的，而非纖維素本身的葡萄糖所降解出來

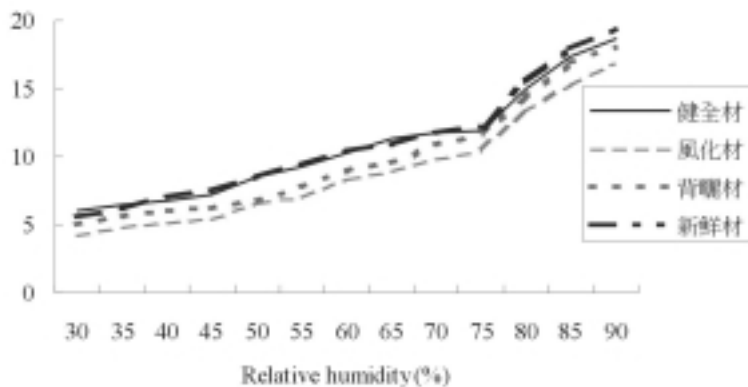


圖 19. 大里林宅柱材在相對濕度 30 ~ 90 % 條件下之含水率

Fig. 19. Moisture content of wood column combinations by moisture absorption from 30 % to 90 % R. H. in the Lin old homestead at Ta-li.

的，同時半纖維素中之半乳糖 (galactose) 和樹膠醛糖 (arabinose) 最容易被水解出來 (Evans *et al.*, 1990)。

四、結論

本文乃針對國內常見的木質建材遭風化、老化與腐朽後之物理性質分析，各劣化材間之尺寸安定性皆明顯下降，天候因子的作用已對木材之物理性質造成若干程度之影響，其結果如下所述：

1. 老舊楹材經天然耐候試驗後之顏色安定性優於健全材。以酒精擦拭老舊楹材之顏色變化 (ΔE^*) 均較蒸餾水擦拭者為低。
2. 日照充足之木材表面顏色易轉變成灰白色且產生不規則之縱向開裂 (霧峰林宅柱材)，受天雨影響後木材顏色容易改變 (如大里林宅柱材)。若木材日照時間較少，同時受長時間之天雨影響，木材表面則呈現纖維剝離、翹起及鬆軟現象，木材腐朽甚易伴隨發生。
3. 由木材表層深度顏色變化可得知木材之劣化深度，宮保第柱材風化面和大里林宅柱材風化面之顏色穩定深度分別為 $105 \mu m$ 和 $45 \mu m$ 。而老舊楹材之顏色穩定深度依序為宮保第楹材 $120 \mu m$ 、大里林宅楹材 $105 \mu m$ 、大花廳中脊楹 $60 \mu m$ ，木材劣化深度直接影響木材之保存性質。
4. 由 SEM 圖觀察風化材表面之劣化，霧峰林宅柱材之管胞壁嚴重開裂及破壞，並喪失原有細胞原貌，而大里林宅之管胞壁輕微折斷、扭曲和變形，破壞程度小於霧峰林宅柱材。老舊楹材之管胞壁上產生不規則開裂及細胞壁破損現象，木質線薄壁細胞間之中膠層亦產生降解，造成薄壁細胞破裂與分離。
5. 風化材或老舊材歷經歲月的無情摧殘，木材表面抵抗轉為脆弱，在高濕環境下，試體表面雖不易吸濕，然厚度膨潤率 (α_R) 卻高

於健全材，由 α_R (%) / HA (%) 之比值觀之，顯示風化材及老舊材易被水分子膨潤。在吸水性方面，風化材之吸水性明顯高於健全材，木材表面有老舊彩繪塗料時，尺寸不安定性更甚於風化材及老舊材，在保存上須謹慎為之。木材吸水率增加主要與木材組織遭嚴重損壞有關。

五、參考文獻

- 奚三采 (1999) 文物的保護技術與材料。國立台南藝術學院出版。台灣台南 36~49 頁。
- 林仁政、洪國榮 (2002(a)) 酸雨及鹽分危害之風化材保存特性。中興大學農學院林業研究季刊 24(1) : 31~46。
- 林仁政、洪國榮、彭秀鳳 (2001) 木材利用觀。中興大學農學院林業研究季刊 23(1) : 101~106。
- 林仁政、洪國榮、彭秀鳳 (2002(b)) 福州杉為台灣重要的文化資材。台灣林業 28(3) : 58~69。
- 林維明 (1995) 耐久環境及現有建築物建材劣化調查。塗料與塗裝技術 (2) : 70~76。
- 張婉真 (1997) 保存與維護定義。古物保存·維護簡易手冊。國立歷史博物館出版。台灣台北市。4~5 頁。
- 張上鎮 (1983) 談木材之天候劣化。林產工業 2(1) : 82~84。
- 張上鎮 (1985) 福州杉魚鱗板之天候劣化。農委會林業試驗所研究報告第 446 號。
- 張上鎮、張惠婷、吳季玲、王升陽 (1997) 反射式傅立葉轉換紅外線光譜分析劣化纖維質材料之化學特性。民俗文物及古蹟生物腐蝕與防治 165~181 頁。
- 陳允適、李武 (1995) 古建築與木質文物維護指南—木結構防腐及化學加固。中國林業出版社出版。中國北京 1~3 頁。
- 三輪嘉六 (2000) 文化資產危機管理的基本課題。一九九九台灣集集大地震古蹟文物震

- 災修復技術諮詢服務報告書 147~149 頁。
- 青木繁夫 (2000) 文化資產修復論。一九九九年台灣集集大地震古蹟文物震災修復技術諮詢服務報告書 155~157頁。
- 福田 清春 (2000) 宣葺き屋根の劣化と高耐久性。木材研究・資料 36 : 1~16。
- 矢田茂樹、田村 健 (1995) 屋外暴露による木材表層部劣化の組織學的研究。木材學會誌 41(11) : 1035~1042。
- Bland, D. E (1971) The relation of lignin and polyphenol content of Tasmanian alpine ash to shrinkage. *Wood Science and Technology* 5 : 17-26.
- Choong, E. T (1969) Effect of extractives on shrinkage and other hygroscopic properties of ten southern pine woods. *Wood Fiber* 1(2) : 124-132.
- Debyshire, H., and E. R. Miller (1981) The photodegradation of wood during solar irradiation. *Holz als Roh-und Werkstoff* (39) : 341-350.
- Dorado, J., T. A. van Beek, F. W. Classen, R. Sierra-Alvarez (2001) Degradation of lipophilic wood extractive constituents in *Pinus sylvestris* by the white-rot fungi *Bjerkandera* sp. and *Trametes versicolor*. *Wood Science and Technology* (35) : 117-125.
- Evans, P.D., and W. B. Bank (1988) Degradation of wood surface by water, Changes in mechanical properties of thin wood strips. *Holz als Roh-und Werkstoff* (46) : 427-435.
- Evans, P. D. and W.B. Banks (1990) Degradation of Wood Surfaces by Water, Weight Losses and Changes in Ultrastructural and Chemical Composition. *Holz als Roh-und Werkstoff* (48) : 159-163。
- Evans, P.D., A. J. Michell, and K. J. Schmalzl (1992) Studies of the degradation and protection of wood surface. *Wood Science and Technology* (26) : 151-163.
- Evans, P. D., N. L. Owen, S. Schmid, R. D. Webster (2002) Weathering and photostability of benzoylated wood. *Polymer degradation and stability* (76) : 291-303.
- Hillis, W. E (1986) Forever amber. A. story of secondary wood components. *Wood Science and Technology* (20) : 203-227.
- Hon, D. N.-S., S. C. Clemson, and W. C. Feist (1986) Weathering characteristics of hardwood surface. *Wood Science and Technology* (20) : 169-183.
- Hon, D. N.-S., and W. C. Feist (1992) Hydroperoxidation in photo irradiated wood surfaces. *Wood and Fiber Science* 24(4) : 448-455.
- Hon, D. N.-S. and S.-T. Chang (1984) Surface degradation of wood by Ultraviolet light. *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.* 22(9) : 2227-2241.
- Williams, R. S (1991) Effects of acidic deposition on painted wood : A review. *Journal of Coatings Technology* 63(800) : 53-73.
- Williams, R. S (1987) Acid effect on accelerated wood weathering. *Forest Products Journal* 37(2) : 37-38.