

框組式木構造間柱變溫炭化深度評估模式研究

曾俊達* 蘇鴻奇** 葉世文***

關鍵字：框組壁工法，木構造，間柱，炭化深度，炭化率

摘要

本研究以框組式木構造之間柱為研究對象，探討間柱木構材於受火害時在變溫條件下之炭化深度預估模式，以期落實木構造技術推動及加強防火避難安全。研究採用本土木材與進口木材，以 600、700 與 800°C 三段固定溫度及 CNS12514 標準升溫模式之變化溫度，進行間柱木構材定溫及變溫加熱炭化實驗，於研究過程以濱田、菅原之定溫炭化評估模式及 White 標準升溫炭化評估模式進行實驗結果分析。研究成果顯示木構材在 CNS12514 標準升溫條件下，以分時段採用濱田、菅原定溫炭化模式與 White 標準升溫炭化模式比較，於加熱 30 分鐘時之結果趨勢相近。

Experimental Modeling of Charring Depth for Framed Wooden-Studs under Variable Temperatures During Burning Stage

Chun-Ta Tzeng* Hung-Chi Su** Shih-Wen Yeh***

KEYWORDS： Platform Construction, Wood Framing, Stud, Charring Depth, Charring Rate

ABSTRACT

The studs of wooden platform construction were deemed to be the subject in this study for the exploration of prediction models for the charring depth of wood under fires of variable temperatures. The purpose of this study was to promote wooden construction technology and to improve the safety of fire protection. The specimens for this study came from both native and imported wood. Three constant-temperature heating conditions-600, 700 and 800°C, and a CNS12514-compliant standard time-temperature curve, were applied to the charring experiments for framed wooden studs. The test results were analyzed against Hamada and Sugawara's charring models for constant-temperature heating conditions and White's standard fire curve. Comparing the afore-mentioned charring models applied to the test results under the heating conditions of the standard time-temperature curve, a fairly good agreement among the results was observed 30 minutes after heating commenced.

*國立成功大學建築系副教授

Associate Professor, Department of Architecture, National Cheng-Kung University, Taiwan

**國立成功大學建築系博士候選人/內政部建築研究所副研究員

Ph. D Candidate, Department of Architecture, National Cheng-Kung University, Taiwan

Associate Researcher, Architecture and Building Research Institute, Ministry of The Interior, Taiwan

***內政部營建署署長

Director-General of Construction and Planning Agency, Ministry of The Interior, Taiwan

一、前言

框組式木構造工法建築物在北美地區行之多年，其構法已達標準化，惟其構造之耐火性能仍引人顧慮。框組式木構造工法垂直向組構特點並無結構柱，其建築物垂直載重力量係由框組壁之牆體傳遞，因此框組式木構造承重牆體之間柱，即是建築物主要傳遞垂直向應力的構件，其間柱斷面尺寸為決定結構承載能力重要因子。

當火災發生時，木構材會受溫度影響產生炭化而減少斷面積，亦會減少傳遞應力之能力(Yang, et al., 2009)，故若能建立間柱受火害炭化評估模式，則可預估間柱受火害後殘餘斷面尺寸，並提供評估框組式木構造工法承重牆之耐火及承重性能參考。一般木構材炭化深度或炭化率評估模式，多設定為標準升溫或固定溫度之加熱溫度條件，但於「木構造承重牆耐火性能驗證研究」(曾俊達，2009)，發現框組式木構造工法牆構造之間柱於火災時，因覆蓋板保護而處於非屬標準升溫狀態的變動溫度條件，即是一種例外之情境。

為延續「框組式木構造區劃牆耐火性能驗證研究」之成果，本研究以框組式木構造承重牆主要承重構件「間柱」於受火害時炭化預估模式為探討主題，進行框組式木構造承重牆間柱木構材於受火害在變溫條件下，炭化深度預估模式之研究，以檢討框組式木構造之耐火性能。

二、研究範圍及對象

框組式木構造牆體構件係由間柱、覆蓋板、填充物與固定件等共同組構而成，可預先在工廠依一定之模矩尺寸與標準規格生產完成，再運至工地現場進行接合，以避免現場作業，而達省工、降低成本、縮短工期、提高品質、減少營建廢棄物之目的(曾俊達，2004)。為配合木構造技術推動，內政部 92 年公告「木構造建築物設計及施工技術規範」，惟其中防火部份尚無具體規範。內政部雖於 97 年通過修正「木構造建築物設計與施工技術規範第九章建築物之防火」(內政部，2008)，但是此規範於實際應用上，仍有部分內涵未盡完善。

近年來國內有關於木構造建築物防火性能之研究已陸續獲致研究成果，其中有關框組式木構造防火性能研究，如：「框組式木構造區劃牆耐火性能驗證研究」其研究內容參考國外木構造工法，使用進口及本土材料，並依據 CNS12514「建築物構造部分耐火試驗法」進行全尺寸防火實驗，以探討框組式木構造區劃牆耐火因子與防火性能之相關性。研究成果顯示覆蓋板與填充材對阻熱性能有直接影響，而覆蓋板材料固定方式除釘長對於防火性能會有影響之外，釘距的減少亦能提升防火性能。

本研究係針對框組式木構造建築受火害時，其牆體構件之間柱炭化深度變化進行驗證研究，探討木構造牆在覆蓋板的保護作用下受火害時，間柱非直接曝火時其炭化深度的變化情形。研究以框組式木構造之間柱為對象，採用台灣本土與進口木材，進行加熱炭化實驗，探討間柱木構材於受火害時在變溫加熱條件下炭化深度之預估模式，以期望強化「木構造建築物設計及施工技術規範」內涵，俾使國內木構造之設計與施工技術更為完善。

三、框組式木構造間柱變溫炭化深度探討方法與步驟

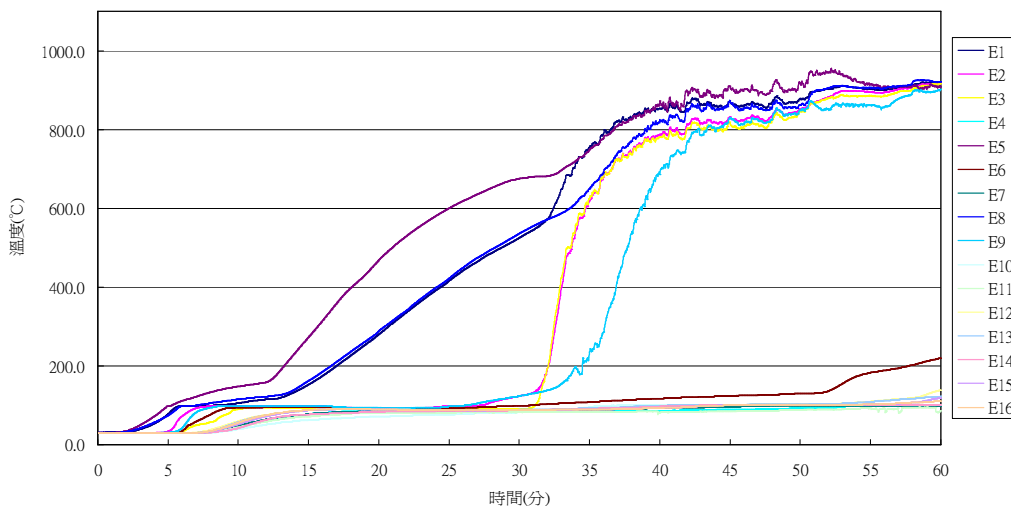
框組式木構造牆體系統依力學行為可分為承重牆與非承重牆，其中承重牆亦常作為防火區劃牆。防火區劃牆為建築物內部阻隔火災水平延燒之主要構件，在火勢控制與安全避難逃生上扮演著極為重要的角色。所以評估框組式木構造工法受火災危害時之安全性，承重牆體構件耐火性能將是一項重要考量因素。而評估間柱受溫度影響之炭化的模式，除可預估間柱火害後殘餘斷面尺寸外，將可進一步提供框組式木構造工法結構設計之參考。

「木構造建築物設計及施工技術規範」之第九章「建築物之防火」其中規定有關木構造梁柱構架系統建築物的防火設計，主要是根據木材高溫燃燒後，所形成之炭化深度來計算木構材防火設計需求。有關木材炭化研究中，目前對於加熱溫度條件為標準升溫曲線的炭化深度預估模式，已有很多基礎資料可供參考(Yang, et al., 2009)(Kodur, et al., 2002)，但是對於框組式構架木構材受熱時若為變溫加熱狀態下，其炭化深度預估分析可供參考的資料較缺乏。

有關框組式木構造牆於標準升溫條件下，其間柱受溫度變化現象與間柱炭化影響因子、木材定溫與變溫炭化評估理論，如下討論。

3-1 框組式木構造牆間柱炭化影響因子討論

由加拿大國家研究委員會 2002 年進行框組式木構造研究(Kodur, et al., 2002)與我國行政院國家科學委員會 2009 年「木構造承重牆耐火性能驗證研究」皆顯示出框組式木構造之牆體構件於 CNS12514 標準升溫曲線條件下進行耐火實驗，牆體構件試體因有覆蓋板阻延熱能傳遞情況下，內部間柱所受溫度變化之現象並非 CNS12514 標準升溫曲線，如圖 1 所示。



註：E1~E16 為框組式木構造牆內部溫度測點

圖 1 框組式木構造牆於 CNS12514 標準升溫條件下之間柱所受溫度變化現象(曾俊達，2009)

框組式木構造牆體構件組構內涵包括：牆體構架材料、間柱斷面與間距、覆蓋板材、填充材、固定件等。其中與間柱炭化有關之影響因素(曾俊達等，2007)，如下所述：

- (1) 構架材料：密度為影響木材炭化主要因素，其餘還包括含水率、油脂量等(濱田稔，1953)。
- (2) 覆蓋板材：覆蓋板材保護間柱於居室火災時，不直接暴露於火焰中並且可阻延熱能傳遞，所以覆蓋板的熱傳導性能會影響間柱所受的溫度條件，使框組式木構造牆體間柱加熱溫度條件非屬標準之升溫模式(Kodur, et al., 2002)。
- (3) 填充材：框組式木構造牆間柱之長軸側面緊貼著填充材。但填充材於牆體內多採用緊塞的施工方式而無搭配其他的固定方式，所以當覆蓋板材受火害影響而崩落時，填充材常容易失去支撐而掉落，則間柱會直接暴露於火焰中增加炭化的速率。
- (4) 固定件：框組式木構造牆體之防火性能主要來自覆蓋板材與填充材，故使覆蓋板延長固定於木構架上之時間，即可以延長防火性能。其固定釘較多且釘長較長時，除能將覆蓋板固定於木構架上時間較長，並可延長覆蓋板崩落的時間，亦可提升防火性能。

3-2 木材定溫炭化評估理論

木構造建築物的防火設計，主要是經由分析木材構件於高溫燃燒後所形成之炭化深度，並計算木材構件所需具備的防火性能設計尺寸。而炭化率是木材於單位時間受火燃燒所產生垂直於燃燒表面的炭化距離亦是炭化深度計算的主要參數，將木材受火燃燒的時間乘上炭化率可得出炭化深度。木材之炭化深度或炭化率預估模式，依據實驗的加熱條件可以分為定溫炭化及變溫炭化預估模式。進行定溫加熱實驗時，加熱溫度設定為固定溫度，而變溫加熱實驗時，係隨著實驗條件需求而變動，為非固定溫度。

有關定溫炭化評估理論，日本學者濱田稔與菅原進一針對木構材炭化實驗之加熱條件採固定溫度，曾經提出定溫炭化深度預估模式。

- (1) 濱田定溫炭化評估模式如下(濱田稔，1953)：

$$x = a\left(\frac{T}{100} - 2.5\right)\sqrt{t} \quad (1)$$

濱田實驗條件設定為氣乾木材，在固定溫度與無氣流條件下進行加熱。相關參數說明如後， x ：炭化深度(mm)。 t ：加熱時間(min)。 T ：加熱溫度(°C)。 a ：依據實驗所得。

- (2) 菅原定溫炭化評估模式如下(菅原進一，1978)：

$$\operatorname{erfc}(\eta) = \frac{\theta - \theta_a}{\theta_f - \theta_a} = \left\{ 1 - \Phi(\sqrt{2}\eta) \right\} \quad (2)$$

$$\theta = (\theta_f - \theta_a)\operatorname{erfc}(\eta) + \theta_a \quad (3)$$

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{kt}} \quad (4)$$

$$X = x - d \quad (5)$$

$$k = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (6)$$

菅原實驗條件設定為採用氣乾木材，在固定溫度與無氣流條件下進行加熱，並運用木材定溫加熱時內部溫度分布情形之理論分析，結合溫度標準常態分配進行炭化分析。相關參數說明如後， η ：相似變數(similarity variable)。 θ_f ：加熱環境溫度(°C)。 θ ：炭化境界溫度(°C)。 θ_a ：初始溫度(°C)。 x ：炭化深度(mm)。 t ：加熱時間(min)。 k ：溫度傳導率(m²/h)。 λ ：熱傳導率(kcal/m.h.°C)。 c ：比熱(kcal/kg°C)。 ρ ：密度(kg/m³)。erfc：餘誤差關係函數。 Φ ：標準常態分配。 X ：熱流進入深度(hydrodynamic entrance length, mm)。

整理以上濱田與菅原之定溫炭化評估模式，以杉木(密度 $\rho=0.35\text{kg/m}^3$) 為例比較兩種評估模式，在 400~800°C 定溫加熱之炭化深度結果，如圖 2 所示。其中 400°C 定溫加熱時，濱田炭化深度評估模式低於菅原評估模式，隨著加熱溫度增加濱田評估模式的增加率大於菅原評估模式，在 700 與 800°C 定溫加熱時濱田評估模式即大於菅原評估模式，且溫度越高炭化深度值差異越大。

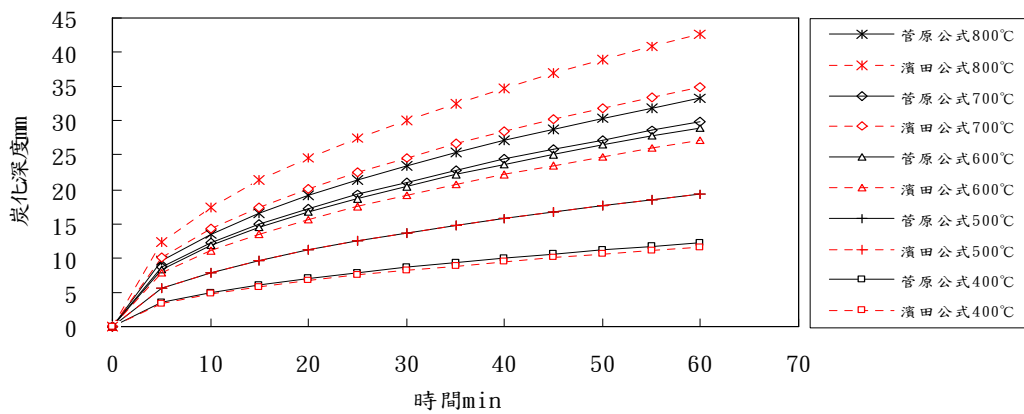


圖 2 濱田與菅原定溫炭化深度評估模式比較圖—以杉木為例

3-3 木材變溫炭化評估理論

有關變溫炭化評估理論，因耐火測試規範之標準升溫曲線，係屬於隨時間改變加熱溫度的模式。目前對於變溫加熱炭化深度或炭化率評估模式，採用耐火測試規範之標準升溫曲線者，例如 ASTM-E119 標準升溫曲線，其炭化深度的評估模式整理如下(White and Nordheim, 1992)：

$$t = m_1 X_c \tag{7}$$

$$t = m_2 X_c - b \tag{8}$$

$$t = m_3 X_c^a \tag{9}$$

$$\ln.t = \ln m_3 + a \ln X_c \tag{10}$$

$$t = m_4 X_c^{1.23} \tag{11}$$

上述公式 (7) ~ (11) 中的共同參數 t 為加熱時間 (min)， x_c 為炭化深度 (mm)，個別參數 $m_1 \sim m_4$ 則為炭化率係數，是炭化率的倒數。利用公式 (7) ~ (11) 進行木材加熱炭化率評估時之適用性，分別說明如下(White and Nordheim, 1992)。

公式 (7) 是單一參數炭化評估模式，假設加熱時間與炭化深度為一次線性關係，為最簡單常用的評估模式。當加熱時間與炭化深度為 60 分鐘與 38mm 時，炭化率係數 m_1 值為 1.575min/mm。

公式 (8) 為雙參數炭化評估模式，考量木材燃燒後會產生較高的炭化率，並於加熱初期缺少炭化層阻隔熱能侵入，且加熱時間與炭化深度亦屬一次線性關係，可利用此評估模式。

公式 (9) 為非線性雙參數炭化評估模式，當 a 值小於 1 時，加熱時間增加則炭化率會增加；當 a 值大於 1 時，加熱時間減少則炭化率會增加；當 a 值等於 1 時，則公式 (9) 的結果與公式 (7) 相同。公式 (9) 與公式 (11) 適用於炭化率穩定且炭化率較慢條件下的評估模式。

公式 (10) 係由公式 (9) 推導而來。

公式 (11) 為非線性單參數炭化評估模式，係美國森林與紙業協會(American Forest and Paper Association；AFPA)進行木構造耐火設計所採用的評估模式，是 Robert H. White 根據 8 種木材種類進行實驗後，所發展出評估木材受熱產生炭化深度之經驗公式。當加熱時間與炭化深度分別為 60 分鐘與 38mm 時， m_4 值為 0.684min/mm^{1.23}(Yang, et al., 2009)。公式 (11) 中炭化率係數 m_4 計算的方式如公式 (12) (White and Dietenberger, 1999)。

$$m_4 = -0.147 + 0.000564 \rho + 1.21\mu + 0.532 fc \quad (12)$$

公式 (12) 為炭化率係數 m_4 的計算方式，其相關參數說明如後， ρ ：木材密度 (kg/m³)。 μ ：木材含水率 (%)。 fc ：木材炭化減少率。由 m_4 計算的方式可以瞭解公式 (11) 的評估模式中，主要影響炭化深度的因子為樹種密度 ρ 與含水率 μ (White and Dietenberger, 1999)，當密度與含水率增加則炭化率減少。

四、框組式木構造間柱炭化實驗規劃

綜合 3-2 節「木材定溫炭化評估理論」與 3-3 節「木材變溫炭化評估理論」的說明，為建立變溫炭化深度預測可行性模式，本研究嘗試以定溫炭化評估模式，進行變溫炭化深度預測可行性討論。研究將進行木構材加熱炭化深度實驗，加熱條件設定為固定溫度與變化溫度兩大類，試體材種於目前國內常用之本土與進口木結構用材中，選取杉木、柳杉、雲杉等三類材種，進行加熱實驗，透過實驗結果探討木構材於變溫條件下炭化深度預估模式，以提供防火設計上之參考。

木構材炭化實驗因加熱溫度條件不同，研究分為兩項實驗進行。第一項為定溫加熱炭化實驗：實驗加熱溫度為定溫時，隨加熱時間的增加，量測炭化深度變化的情況。第二項實驗為變溫炭化實驗：在實驗所設定加熱時間內，加熱溫度係為非固定溫度，實驗以 CNS12514 之標準升溫加熱曲線為變溫炭化實驗之加熱條件設定，量測變溫加熱之炭化深度。

透過實驗與分析方式，對這二項實驗結果以定溫加熱炭化深度評估模式，進行變溫炭化深度預測可行性討論。探討間柱木構材在覆蓋板保護下，處於變溫加熱條件時，預估木構材炭化深度評估模式，研究成果將可提供木構造工法設計參考。

4-1 間柱炭化實驗因子研擬

木材的炭化應屬暫態行為(transient)，不同的木材與模式，均有其各自的炭化行為。我國目前對木構材炭化試驗尚未有明確規範，因此對於炭化實驗設計，本研究參考 CNS 規範與文獻之實驗方法，實驗因子設定為加熱條件、加熱時間、試體樹種、受熱面等，各項實驗因子說明如後。

有關加熱條件設定，依據本研究目的，針對定溫炭化與變溫炭化進行實驗。第一項定溫炭化實驗溫度規劃，因木構材產生炭化層之溫度約為 300°C，所以加熱溫度設定於 300~800°C 範圍，加熱溫度增加間距設定為 100°C。第二項變溫炭化實驗溫度規劃，參考 CNS12514 標準升溫曲線，作為變溫炭化實驗之加熱溫度。實驗加熱時間參考防火時效等級設定為 30 分鐘、60 分鐘，本實驗為增加觀測與分析的精確性除紀錄上述 2 個時段之炭化深度，並在加入 45 分鐘之實驗，使三個時段呈 15 分鐘之相等距差。試體材種選取杉木(福州杉)、柳杉及雲杉為實驗材種，杉木與柳杉為國產材種，屬於軟木，常應用於傳統建築；雲杉為進口木材常見之結構用材。

試體加熱方式係考量框組式木構造工法牆體中之間柱於火災時炭化之狀態，於參考「框組式木構造區劃牆耐火性能驗證研究」耐火性能實驗結果顯示，間柱為三面炭化狀態，其中與加熱面覆蓋板結合位置處炭化最嚴重，其餘間柱長軸二側的位置次之，而與非加熱面覆蓋板結合的位置未炭化，所以實驗採取三面加熱方式。試體尺寸設定，因實驗採取三面加熱，須考量實驗過程中試體炭化狀態，參考「木構造建築物設計及施工技術規範」(內政部，2008)，非集成材 60 分鐘炭化深度為 60mm 之規定，以及 2×4 與 2×6 間柱斷面尺寸為 38mm×89mm 與 38mm×140mm 不足 60 分鐘炭化深度規定，故試體斷面尺寸設定為 14 cm×14cm，長度尺寸依據試驗電爐加熱空間設定為 18cm。試體含水率設定小於 19%，以符合 CNS14631「框組壁工法結構用製材」之規定。每種實驗條件並重複進行 3 次實驗，以提供後續實驗因子討論分析。

4-2 間柱炭化實驗條件的設定與程序

依據 4-1 節間柱炭化實驗因子研擬的討論，於間柱炭化實驗條件的設定與程序如後所說明。

- (1) 本研究有關試體材種與尺寸，依據前節之說明選取杉木、柳杉及雲杉共 3 種，試體斷面尺寸為 14cm×14cm，長度為 18cm，如圖 3 所示，須進行養護至含水率 19% 以下。



(a) 杉木試體 14cm×14cm×18cm (寬×深×長)



(b) 雲杉試體 14cm×14cm×18cm (寬×深×長)

圖 3 炭化實驗試體照片

本研究加熱實驗儀器主要為方型電爐，如圖 4 所示，加熱方式採用電加熱絲系統，為保持爐內溫度分佈之均勻性，電加熱絲鑲嵌於爐內上下左右四面爐壁表面。其中電爐加熱溫度控制方式乃透過爐內測溫棒控制。記錄爐內溫度值另加設 2 具 k 型熱電偶，並連線至電腦做即時監控記錄。

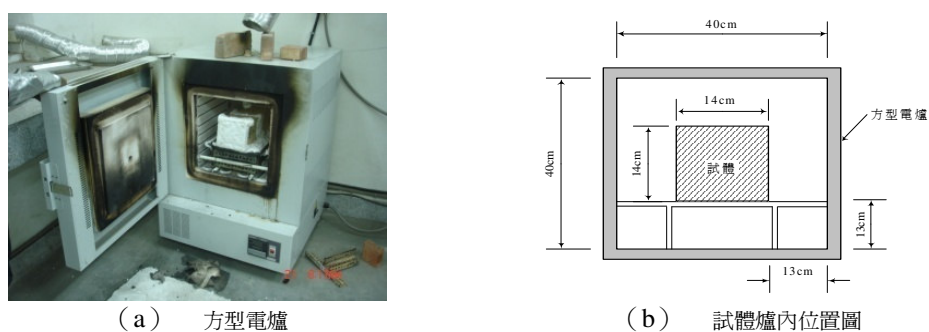


圖 4 方型電爐設備外觀與立面圖

- (2) 依據木材在加熱條件下，發生燃燒現象並產生炭化之溫度約 300°C ，因此固定溫度加熱炭化實驗之溫度設定於 300°C 開始，每一個區段溫度增加 100°C 為原則，最末段的溫度增加至 800°C 為止，故於「定溫炭化實驗」部分之加熱升溫條件，預定規劃為 300 、 400 、 500 、 600 、 700 與 800°C 等六段溫度。
- (3) 「變溫炭化實驗」部分之加熱升溫條件，參考國內外有關適用於建築物構造之耐火性能實驗方法，包含：ISO834、BS476、ASTM E119、UL263 與 CNS12514 等規範，相關規範之加熱升溫曲線整理，如圖 5 所示。其中 CNS12514 之標準升溫曲線與 ISO834、BS476 規範相同外，ASTM E119 標準升溫曲線亦與 UL263 規範相同。而 CNS12514 僅約於開始加熱後升溫 10 分鐘至 30 分鐘時較低於 ASTM E119 與 UL263，其餘時間則較高。相較於 ASTM E119 與 UL263，則 CNS12514 標準升溫曲線之升溫趨勢差異不大，亦即進行 30 分鐘耐火性能實驗時，ASTM E119 與 UL263 升溫曲線條件較嚴格；於進行 1 小時以上耐火性能實驗時，則以 CNS12514 升溫曲線條件較嚴格。因此本研究於「變溫炭化實驗」之加熱升溫條件採用 CNS12514 標準升溫曲線。

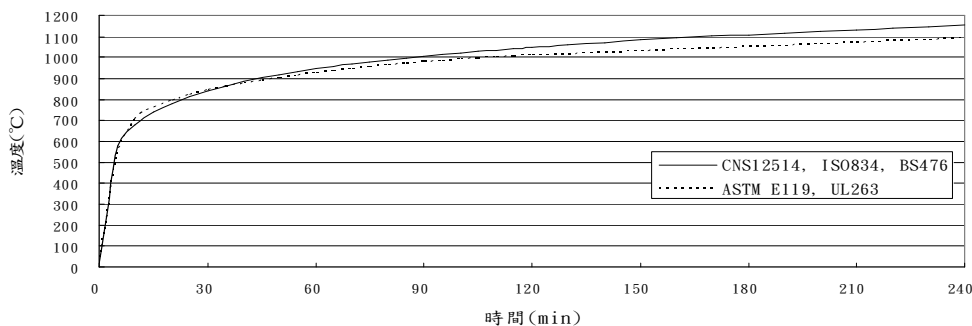


圖 5 CNS12514、ISO834、BS476、與 ASTM E119、UL263 加熱時間升溫曲線比較圖

(4) 實驗的程序包含預備實驗與正式實驗二個階段，如圖 6 實驗流程所示。為確認實驗步驟與實驗因子設定，第一階段先以三種木材試體進行預備實驗，實驗時間設定 60 分鐘，固定加熱溫度設定為 300、400、500、600、700 與 800℃ 等六段溫度，以作為第二階段正式實驗因子設定參考。

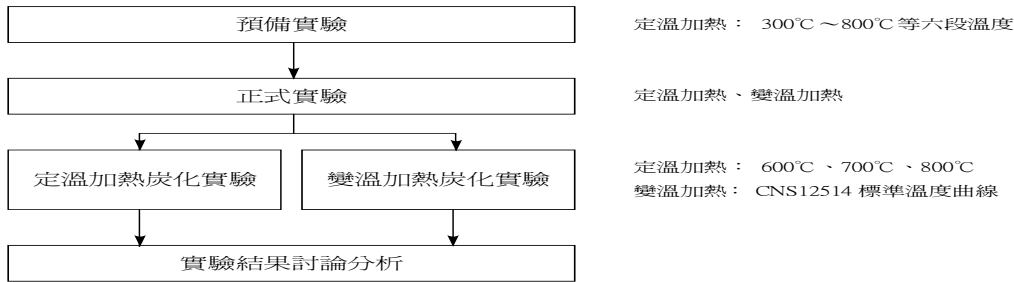


圖 6 實驗流程圖

(5) 定溫加熱預備實驗結果顯示，加熱時間為 60 分鐘時，固定加熱溫度於 300、400 與 500℃ 這三段溫度之炭化深度實驗值皆未超過 10mm，其數據對於後續分析較不顯著，如表 1 所示。所以後續加熱炭化實驗之加熱溫度乃設定為 600、700 與 800℃ 三個範圍，正式實驗因子依據上述預備實驗之結果修正設定，如表 2 所示。

表 1 定溫加熱 300、400、500、600、700 與 800℃ 預備實驗結果

試體材種	加熱溫度 (°C)	加熱時間 (min)	密度 (kg/m ³)	《試體底部》		《試體側邊》	
				炭化深度 (mm)	炭化率 (mm/min)	炭化深度 (mm)	炭化率 (mm/min)
杉木	300	60	536.4	焦炭	—	焦炭	—
	400	60	451.5	6.18	0.10	5.12	0.09
	500	60	604.5	2.60	0.04	4.83	0.08
	600	60	468.2	11.96	0.20	11.78	0.20
	700	60	504.9	16.92	0.28	18.05	0.30
	800	60	478.6	22.56	0.38	23.27	0.39
柳杉	300	60	491.3	焦炭	—	焦炭	—
	400	60	422.2	4.62	0.08	5.70	0.09
	500	60	464.4	10.00	0.17	7.60	0.13
	600	60	504.4	19.82	0.33	19.13	0.32
	700	60	423.9	29.22	0.49	30.87	0.51
	800	60	438.0	37.26	0.62	37.85	0.63
雲杉	300	60	446.7	0.08	0.00	0.03	0.00
	400	60	453.7	6.30	0.11	2.61	0.04
	500	60	464.5	7.62	0.13	9.30	0.16
	600	60	510.6	16.52	0.28	15.17	0.25
	700	60	497.1	25.84	0.43	24.14	0.40
	800	60	510.7	37.26	0.62	34.77	0.58

表 2 實驗因子設定表

實驗因子種類	加熱條件 (°C)		加熱時間 (分鐘)	受熱面	試體樹種	
	定溫加熱	變溫加熱			國內樹種	國外樹種
實驗因子設定	600、700、800	標準加熱溫度曲線	30、45、60	三面受熱	杉木、柳杉	雲杉
實驗因子設定說明	依木構材開始形成炭化之溫度進行溫度設定。參考 CNS12514 標準升溫曲線。		參考防火時效規定，設定 30 分鐘與 60 分鐘，再加測 45 分鐘以利分析討論。	模擬間柱受熱情況。	木構材試體斷面尺寸：14cm×14cm×18cm (寬×深×長)。	

4-3 分時段定溫炭化深度評估模式進行變溫炭化深度預測之計算方式說明

木材炭化深度或炭化率的評估模式，一般多設定為標準升溫或固定溫度的條件。為評估木材炭化的升溫是變化溫度，而非屬於標準火源或固定溫度條件，例如受覆蓋板保護之框組式木構造牆間柱受火害炭化情況，本研究嘗試利用文獻中固定溫度之評估炭化模式，進行變動溫度條件之評估炭化模式可行性討論。

濱田（公式 1）及菅原（公式 2）炭化評估模式是設定固定溫度加熱條件，為利用此種評估模式，進行變動溫度條件之評估炭化模式，評估程序先將所欲評估的整體時間平均分成若干個時段，再將每個時段之變動加熱溫度平均，而得到該時段的平均加熱溫度，如圖 7 所示。

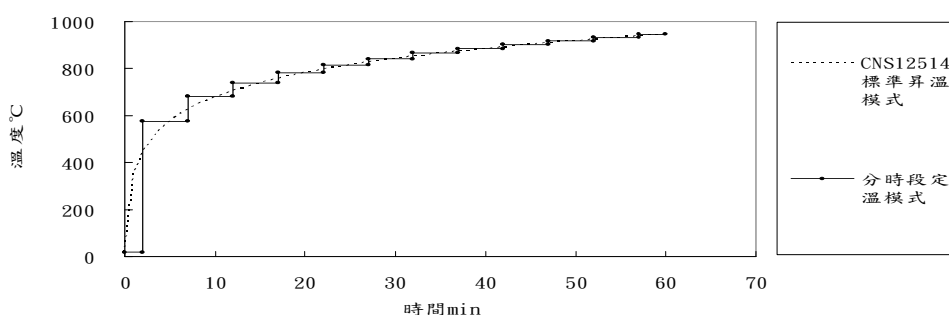


圖 7 變動溫度模式轉換分時段定溫模式－以 CNS12514 標準升溫曲線為例

因木材加熱後生成的炭化層具有阻熱性保護效果，炭化層隨加熱時間增加而越厚，阻熱效果越大，炭化速率會逐漸減少，故定溫炭化深度的評估模式隨著時間的炭化而呈現非一次線性曲線。所以採取定溫炭化評估模式進行該時段之炭化深度值計算時，須先求得該時段之前所累積的炭化深度值，對應到所欲評估的定溫炭化曲線，確定炭化的時間起點，再計算該時段產生炭化的深度，如圖 8 所示。

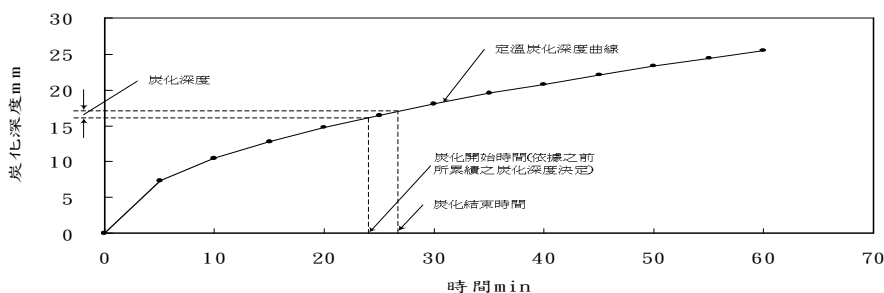


圖 8 以定溫炭化模式計算特定時段內炭化深度示意圖

綜合上述之討論，本研究以分時段定溫炭化深度評估模式進行間柱變溫炭化深度預測，其計算程序即是先於變溫炭化時間內均分為若干時段，而每一個時段皆有特定之固定加熱溫度，再以定溫炭化模式分別計算每一個時段內之炭化深度，並將各時段的炭化深度合計，則可以求得整體時間的總炭化深度。

五、間柱炭化實驗結果整理與分析

本研究主要進行兩項實驗，第一項為間柱定溫加熱炭化深度實驗，第二項為間柱變溫加熱炭化深度實驗。正式實驗係經由預備實驗結果與設定條件檢討後，以確定正式實驗因子。正式實驗結果整理後進行實驗因子影響性分析，並探討定溫炭化深度評估模式進行變溫炭化深度預測的合理性。相關實驗結果與分析討論如下。

5-1 間柱炭化實驗結果彙整

杉木、柳杉、雲杉等三種木材採用電熱絲加熱方式，於 600、700 與 800°C 等 3 種固定溫度條件下進行炭化深度實驗之結果，如表 3 所示。

表 3 三種木材進行定溫炭化深度實驗結果

試體材種	加熱溫度 (°C)	加熱時間 (min)	密度 (kg/m ³)	《試體底部》		《試體側邊》	
				炭化深度 (mm)	炭化率 (mm/min)	炭化深度 (mm)	炭化率 (mm/min)
杉木	600	30	407.5	9.0(1.4)	0.30(0.05)	9.5(0.8)	0.32(0.03)
		45	432.5	11.0(1.2)	0.25(0.03)	11.9(2.4)	0.26(0.05)
		60	416.7	17.2(4.6)	0.29(0.03)	14.5(2.4)	0.24(0.04)
	700	30	416.4	12.0(0.7)	0.40(0.02)	12.2(0.1)	0.40(0.01)
		45	420.2	19.1(2.2)	0.42(0.05)	17.0(1.9)	0.38(0.04)
		60	462.2	22.0(5.7)	0.37(0.10)	21.1(4.1)	0.35(0.07)
	800	30	432.0	17.4(0.3)	0.58(0.01)	17.8(0.9)	0.59(0.03)
		45	427.4	27.0(2.5)	0.60(0.06)	24.7(2.3)	0.55(0.05)
		60	372.4	47.4(7.0)	0.79(0.12)	38.4(6.6)	0.64(0.11)
柳杉	600	30	479.9	7.1(2.2)	0.24(0.07)	9.4(1.8)	0.31(0.06)
		45	445.5	13.2(1.2)	0.29(0.03)	14.8(1.0)	0.33(0.02)
		60	490.1	19.5(1.9)	0.32(0.03)	19.3(1.9)	0.32(0.03)
	700	30	491.5	16.1(3.2)	0.54(0.11)	14.8(0.3)	0.49(0.01)
		45	477.6	23.4(2.8)	0.52(0.06)	22.7(1.1)	0.50(0.02)
		60	475.0	26.6(2.9)	0.44(0.05)	27.9(2.8)	0.46(0.05)
	800	30	471.3	20.1(1.4)	0.67(0.05)	20.3(2.4)	0.68(0.08)
		45	475.8	30.6(3.7)	0.68(0.08)	28.3(4.7)	0.63(0.11)
		60	461.9	39.0(5.5)	0.65(0.09)	38.1(0.3)	0.64(0.01)
雲杉	600	30	508.7	10.5(0.9)	0.35(0.03)	9.0(0.8)	0.30(0.03)
		45	489.0	13.9(2.5)	0.31(0.06)	11.0(0.9)	0.24(0.02)
		60	511.2	18.2(1.5)	0.30(0.03)	17.3(2.9)	0.29(0.05)
	700	30	478.6	16.0(0.5)	0.53(0.02)	13.8(1.1)	0.46(0.04)
		45	474.0	20.4(1.8)	0.45(0.04)	17.8(1.6)	0.40(0.03)
		60	506.8	24.4(1.4)	0.41(0.02)	23.9(1.9)	0.40(0.03)
	800	30	482.1	20.9(2.1)	0.70(0.07)	18.1(1.0)	0.60(0.03)
		45	479.7	29.0(0.4)	0.64(0.01)	27.4(3.2)	0.61(0.07)
		60	504.5	34.4(2.7)	0.57(0.05)	31.8(2.7)	0.53(0.04)

註：1.密度值為加熱實驗前。2.括弧內為標準差。3.試體平均密度杉木 421kg/m³、柳杉 474kg/m³、雲杉 493kg/m³。
4.60 分鐘炭化深度平均值杉木 26.8mm、柳杉 28.4mm、雲杉 25.0mm。

表 4 為杉木、柳杉、雲杉等三種木材，採用加熱方式為電熱絲加熱方式，於 CNS12514 標準升溫條件下進行炭化深度實驗結果。木材定溫加熱炭化實驗結果顯示炭化率為 30 > 45 > 60 分鐘，亦即加熱初期炭化率較快速，隨著時間增加炭化層厚度逐漸增加，而炭化層有阻熱效果，所以加熱時間越長炭化層越厚，阻熱效果越大，炭化的速率會有逐漸減少的趨勢。

表 4 三種木材進行 CNS12514 標準升溫炭化實驗結果

試體材種	加熱溫度 (°C)	加熱時間 (min)	密度 (kg/m ³)	《試體底部》		《試體側邊》	
				炭化深度 (mm)	炭化率 (mm/min)	炭化深度 (mm)	炭化率 (mm/min)
杉木	CNS12514	30	481.1	18.6(6.6)	0.62(0.22)	17.3(4.8)	0.58(0.16)
		45	507.8	25.4(12.0)	0.56(0.27)	24.1(10.5)	0.54(0.23)
		60	461.9	33.0(9.5)	0.55(0.16)	29.7(8.4)	0.49(0.14)
柳杉	CNS12514	30	499.2	18.0(0.4)	0.60(0.01)	20.1(1.8)	0.67(0.06)
		45	473.4	30.3(2.7)	0.67(0.06)	31.1(0.9)	0.69(0.02)
		60	472.9	47.4(2.2)	0.79(0.04)	45.1(3.5)	0.75(0.06)
雲杉	CNS12514	30	515.6	20.1(2.0)	0.67(0.07)	17.9(1.0)	0.60(0.03)
		45	486.0	32.5(1.5)	0.72(0.03)	31.2(2.5)	0.69(0.05)
		60	482.1	47.7(0.1)	0.79(0.01)	37.1(11.1)	0.62(0.19)

註：密度值為加熱實驗前；括弧內為標準差

5-2 木材密度因子與炭化深度相關性討論

杉木、雲杉、柳杉試體密度範圍，由表 3 之 600、700 與 800°C 定溫炭化實驗試體統計約為 400 ~ 500kg/m³，試體平均密度與排序關係為雲杉 493kg/m³> 柳杉 474kg/m³> 杉木 421kg/m³。60 分鐘定溫炭化實驗結果顯示，炭化深度平均值為柳杉 28.4mm> 杉木 26.8mm> 雲杉 25.0mm。本研究實驗之三種木材於定溫加熱條件下，顯示其炭化深度與密度因子之相關性並不顯著，如圖 9 所示。

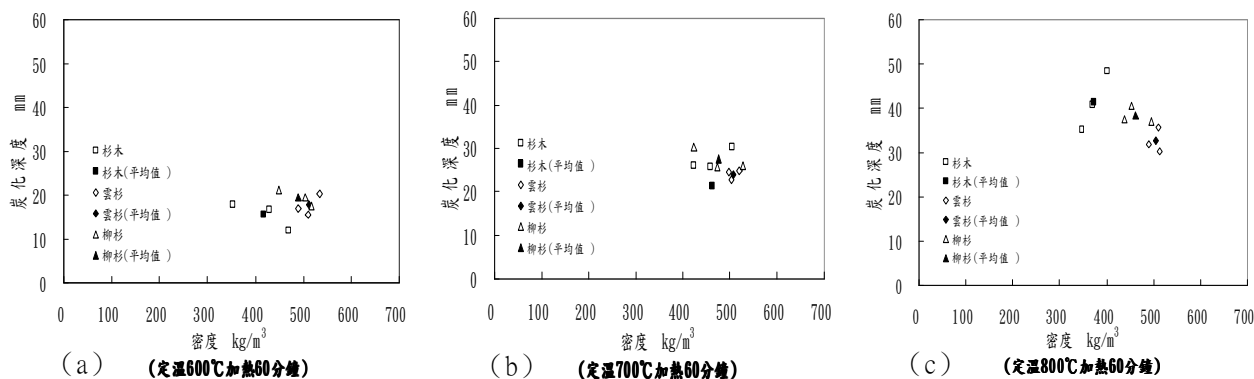


圖 9 木材密度與定溫加熱炭化深度比較圖

部份有關木材炭化深度評估模式之文獻顯示，木材密度是影響炭化深度與炭化率主要原因之一，而且密度增加則炭化深度與炭化率相對減少(濱田稔，1953)(菅原進一，1978)。惟本研究中定溫加熱於 600、700 與 800°C 炭化實驗結果顯示炭化深度與密度之相關性不高 (R² 分別為 0.004、0.041、0.256)。在 Yang, et al., (Yang, et al., 2009)的研究中木材試體密度範圍為 398~538 kg/m³，其密度與炭化深度之關係性分析結果，也顯示出木材密度與炭化深度沒有顯著的相關性，Hugi, et al., (Hugi, et al., 2007)與 Lingens, et al., (Lingens, et al., 2005) (密度 350~750 kg/m³) 的研究內容也獲致相同結果。

5-3 定溫炭化深度實驗結果與評估模式比較

濱田的定溫炭化深度評估模式（公式 1）其中 a 為一項主要參數與密度有相關性(濱田稔，1953)，菅原的定溫炭化深度評估模式（公式 2）除了密度之外，還考量熱傳導率性質，並說明雖然不同材種的熱傳導率 λ 在常溫時並不相同，但木材在高溫處於熱分解炭化狀態時熱傳導率 λ 皆採 $0.07(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ ，所以本研究利用菅原定溫炭化深度評估模式，三種木材的熱傳導係數 λ 亦同菅原之說明採用 $0.07(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ (菅原進一，1978)。故當加熱溫度分別設定 $600\cdot 700$ 與 800°C 時，推導得出炭化深度的計算式分別為 $x = 1.12\sqrt{kt} - d$ 、 $x = 1.15\sqrt{kt} - d$ 與 $x = 1.28\sqrt{kt} - d$ 。

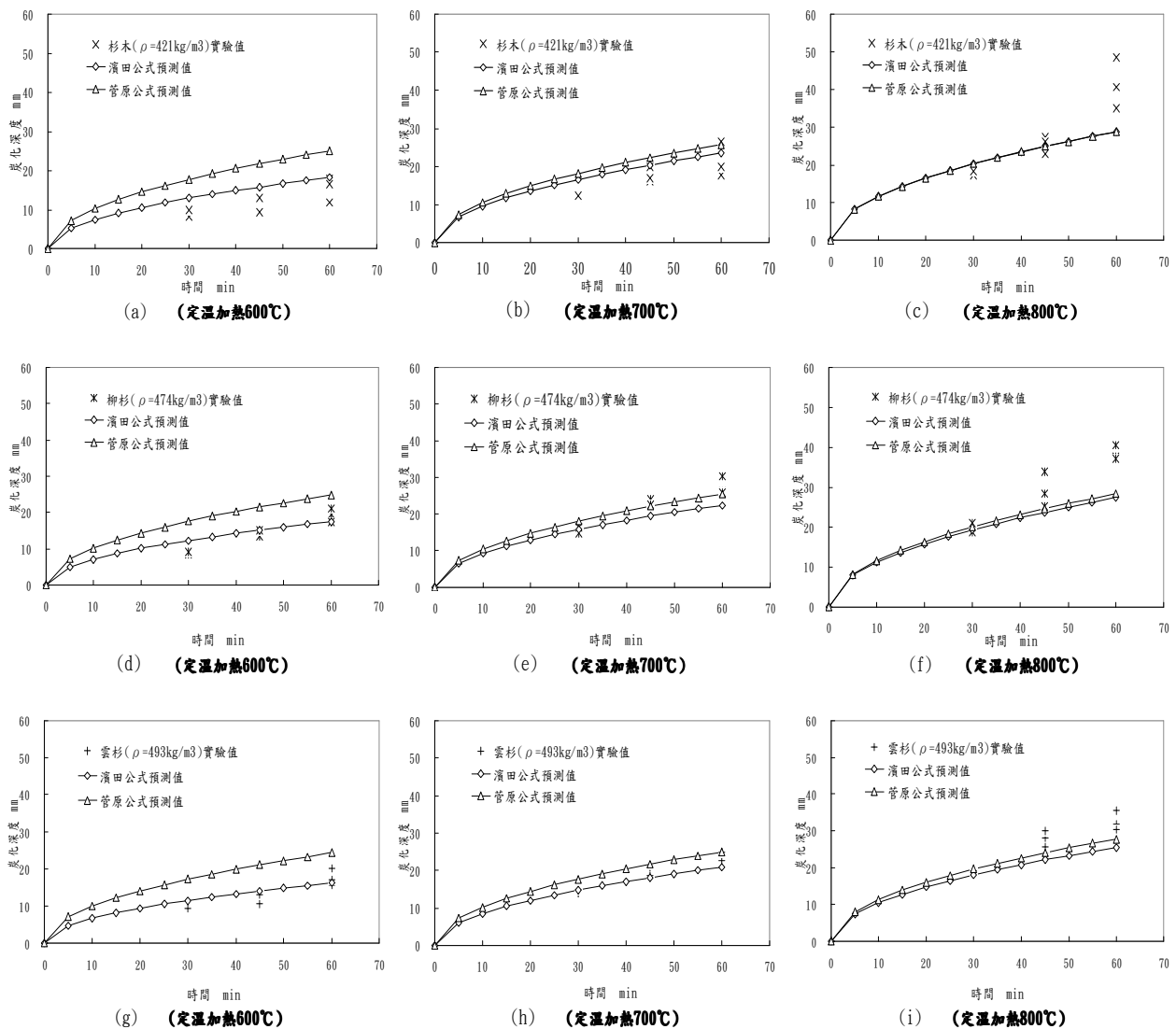


圖 10 濱田與菅原定溫炭化預測公式與實驗值比較

將本研究實驗試體所採用的三種材種的密度 ρ (杉木 421 kg/m³、柳杉 476 kg/m³、雲杉 493kg/m³) 與定溫 (600、700 與 800°C) 參數代入以上兩種定溫炭化深度評估模式，結果如圖 10 所示。圖 10 顯示菅原的評估炭化深度較大，但隨著溫度增加，濱田的評估炭化深度增加率較菅原為高，所以二者的評估炭化深度差距會著溫度增加而減少。試體材種密度的減少也會使二者的評估炭化深度差距減少。亦即當加熱於 600~800°C 定溫的條件下，且密度約為 421kg/m³ 以上時，菅原的評估炭化深度較大，而隨著加熱溫度增加與密度減少時，會使菅原與濱田二者評估炭化深度差距減少。

由定溫炭化實驗結果，比較菅原與濱田二者的評估炭化深度，如圖 10 所示。顯示密度較小的杉木其炭化深度實驗值結果之間差異性較大，雲杉與柳杉炭化深度實驗值結果間差異性較小。所以杉木炭化深度實驗值結果，與濱田及菅原的炭化評估模式比較差異性較大。雲杉與柳杉在 600 與 700°C 定溫炭化深度實驗結果與濱田及菅原的炭化評估模式比較差異性小，在 800°C 定溫炭化深度實驗值的結果則皆高於濱田及菅原的炭化評估模式。

5-4 分時段定溫炭化深度評估模式進行變溫炭化深度預測可行性討論

CNS12514 或 ASTM-E119 規範的標準升溫曲線皆是屬於變化溫度的加熱條件。所以依前述 4-3 節所討論方式，將標準升溫曲線條件以分時段定溫炭化深度評估模式，代入濱田與菅原炭化深度評估模式，再與 White 標準升溫炭化評估模式 (公式 7) 進行比較分析，探討以分時段定溫炭化深度評估模式來進行變動溫度炭化深度預測的可行性討論。

將濱田評估模式 (公式 1) 與菅原評估模式 (公式 2)，依據前述分時段定溫炭化深度評估模式進行 CNS12514 升溫炭化深度預測結果，如表 5 與圖 11 所示。菅原評估模式的炭化深度在這三種木材開始加熱階段比濱田模式大，但隨時間延續，濱田評估模式的炭化速率增加較菅原評估模式大，木材材種密度越小炭化速率增加越大，在加熱炭化實驗進行至 60 分鐘時濱田評估模式對於杉木與雲杉這二種木材的炭化深度大於菅原評估模式。

表 5 三種木材以分時段定溫炭化評估模式進行 CNS12514 升溫炭化深度預測結果表

加熱溫度 加熱時間	杉木			柳杉			雲杉			
	炭化深度mm			炭化深度mm			炭化深度mm			
	濱田公式	菅原公式	White公式	濱田公式	菅原公式	White公式	濱田公式	菅原公式	White公式	
	ρ 密度 =421kg/m ³ a=0.78	ρ 密度 =421kg/m ³ a=0.78	ρ 密度 =421kg/m ³ 含水率=18%	ρ 密度 =474kg/m ³ a=0.65	ρ 密度 =474kg/m ³ a=0.65	ρ 密度 =474kg/m ³ 含水率=18%	ρ 密度 =493kg/m ³ a=0.60	ρ 密度 =493kg/m ³ a=0.60	ρ 密度 =493kg/m ³ 含水率=18%	
	30min	21.4	21.9	19.7	17.6	18.8	19.1	16.3	18.5	18.9
CNS12514	45min	28.8	30.1	27.4	23.7	24.3	26.6	22.0	23.8	26.3
	60min	35.5	38.8	34.7	29.3	29.0	33.6	27.1	28.5	33.2

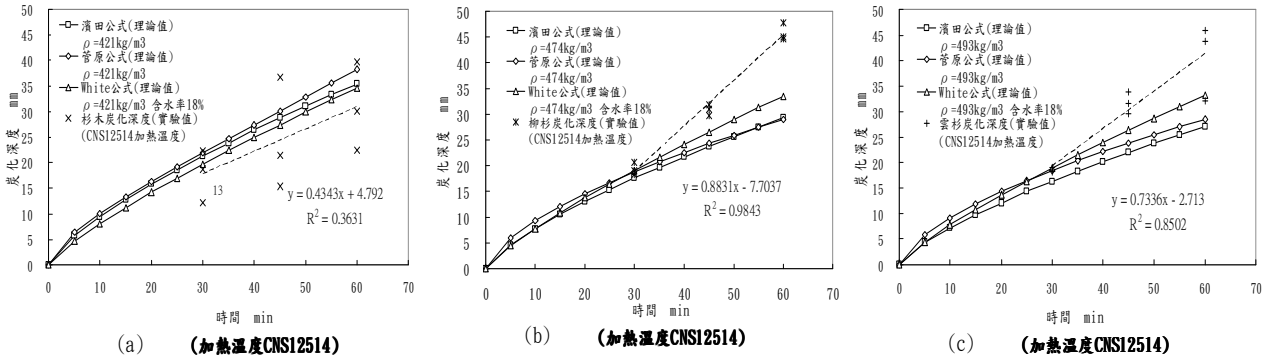


圖 11 分時段定溫炭化評估 CNS12514 升溫炭化深度預測與 CNS12514 加熱炭化實驗結果比較圖

以濱田、菅原炭化評估模式進行變動溫度（CNS12514）炭化評估，與 White 評估模式結果比較，在開始加熱階段濱田與菅原評估模式的炭化深度皆大於 White 評估模式，但隨著加熱時間的延續，White 評估模式的炭化速率增加比濱田與菅原評估模式大。在加熱 30 分鐘時，White 評估模式炭化深度即會大於濱田與菅原評估模式。密度因素對於三種評估模式而言，則是密度增加時，炭化深度會減少，所以材種密度從杉木 $421\text{kg}/\text{m}^3$ 變化至雲杉 $493\text{kg}/\text{m}^3$ ，密度增加 17%，濱田評估模式炭化深度減少率最多為 24% 影響最顯著，菅原評估模式次之為 22%，White 評估模式減少率最少為 4%，所以密度的因素影響炭化深度，這三種評估模式當中，以濱田評估模式影響最大。以濱田與菅原評估模式分時段定溫炭化評估 CNS12514 升溫加熱炭化深度預測結果比較 White 評估模式（含水率 18%、密度 421~493 kg/m^3 ）預測結果，30 分鐘的炭化深度預測值間之差異約為 0.3~2.6mm，60 分鐘的炭化深度預測值間之差異約為 0.8~6.1mm。

杉木、柳杉、雲杉三種木材以 CNS12514 標準升溫條件加熱後，其炭化深度實驗的結果比較濱田、菅原分時段定溫炭化評估模式與 White 評估模式，如圖 11 所示。三種木材在加熱至 30 分鐘時，其實際炭化深度值與三種炭化評估模式理論估算值相近；柳杉、雲杉二種木材加熱 45 分鐘、60 分鐘，實際炭化深度值皆大於三種炭化深度評估模式估算值。亦即以菅原分時段定溫炭化評估模式為例，當木構材密度增加時如柳杉 $474\text{kg}/\text{m}^3$ 與雲杉 $493\text{kg}/\text{m}^3$ ，同時隨著加熱時間增加至 45 分鐘與 60 分鐘，則炭化深度實驗結果大於理論評估值，且炭化深度的平均增加率約 30% 與 50%。

六、結語

本研究於變溫加熱評估時採 CNS12514 標準升溫加熱條件下，以分時段採用濱田、菅原定溫炭化預估模式與 White 標準升溫炭化預估模式比較，在加熱 30 分鐘時，分時段定溫炭化與標準升溫炭化評估模式之結果趨勢相近。但定溫與變溫二類評估模式之預測值，與本研究所進行定溫及標準升溫炭化實驗之實際值比較，則存有差異。此種現象於部份文獻亦有相類似之研究結果，此即顯現出木材為天然之複合材料，其中木材種類、成長條件、加工型態、組成成份等因素變化甚多，皆容易造成實驗結果的差異性。

本研究以框組式木構造承重牆間柱為研究對象，探討間柱木構材受火害時在變溫條件下之炭化評估模式。研究結果顯示，將所欲評估的變溫加熱時間範圍區分為若干時段，並平均每一時段內之變動加熱溫度，再以濱田及菅原定溫炭化評估模式分別計算該時段定溫炭化深度，合計各時段炭化深度值，即可得到以定溫加熱評估模式求得間柱變溫加熱炭化深度的預測結果與趨勢。具體之研究結論如下說明：

- (1) 本項框組式間柱變溫炭化研究之實驗採用杉木、雲杉、柳杉等 3 種木材試體，探討 600、700 與 800°C 三段固定溫度與 CNS12514 標準升溫加熱條件下其炭化深度的變化情形。實驗結果顯示出木材密度性質對炭化深度的相關性並不顯著，如此也是導致炭化深度理論評估模式與加熱炭化實驗結果誤差的原因之一。
- (2) 濱田、菅原炭化深度評估模式與 White 炭化深度評估模式皆有考慮密度因素，當密度增加時，炭化深度會減少，於本文 5-4 討論定溫炭化評估模式進行 CNS12514 加熱炭化評估結果顯示，材種密度從杉木 421kg/m³ 變化至雲杉 493kg/m³ 時，濱田評估模式炭化深度減少 24%，菅原評估模式減少 22%，White 評估模式減少 4%。在上述評估模式中，密度因素對於炭化深度的影響，以濱田評估模式影響最大。
- (3) 研究過程將濱田與菅原炭化深度評估模式，分別依據分時段定溫炭化深度評估模式進行 CNS12514 標準升溫炭化深度預測，預測結果顯示出是與標準升溫條件 White 評估方式結果趨勢有一致性。當評估條件設定間柱木構材含水率為 18%、密度於 421~493 kg/m³，以濱田與菅原炭化深度評估模式進行 CNS12514 標準升溫炭化深度預測並與 White 評估方式比較，於加熱 30 分鐘炭化深度預測值間之差異約為 0.3~2.6mm，而於加熱 60 分鐘炭化深度預測值間之差異約為 0.8~6.1mm，顯示上述評估方式之結果趨勢相近。

綜合本研究之成果，除上述討論事項外，研究過程與結果亦顯示，因木材為天然及非均質的材料，即使相同材料間的實驗結果，仍存有相當的差異性。雖然不同木構材炭化評估模式有使用的限制，對於以濱田與菅原評估方式進行 CNS12514 標準升溫炭化深度預測，其預測結果與實驗結果進行比較，在 30 分鐘時實驗結果與分時段定溫炭化評估模式結果相近；但是木構材密度增加時，如柳杉 474kg/m³ 與雲杉 493kg/m³，且加熱時間增加至 45 分鐘與 60 分鐘，則炭化深度實驗結果大於理論評估值約 30% 與 50% 之研究成果將可提供木材於變溫加熱條件下，因加熱炭化造成斷面尺寸變化預估之參考。

致謝

本研究 承行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 (NSC- 96-2221-E-006-237-MY2) 「木構造承重牆耐火性能驗證研究」提供研究經費，及 承蒙內政部建築研究所台南防火實驗中心協助性能驗證實驗，謹此致謝。

參考文獻

- 內政部 (2008) 《木構造建築物設計及施工技術規範》。
- 曾俊達 (2009) 〈木構造承重牆耐火性能驗證研究〉《行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告》。
- 曾俊達, 蘇鴻奇, 葉世文 (2007) 〈框組式木構造區劃牆耐火性能驗證研究〉《建築學報》, 第 59 期: 145-162。
- 曾俊達 (2004) 〈框組壁工法壁體防火性能檢證〉《台加合作木質構造建築物之防火、耐久性市場研討會論文集》: 81-90, 加拿大 BC 省總商會台北服務處。
- 濱田稔 (1953) 〈木材の燃燒速度〉《日本火災学会論文集》Vol.2(3): 11-12。
- 菅原進一 (1978) 〈木材の炭化速度に関する考察〉《日本建築學會大會學術講演梗概集》。
- Hugi, E., Wuersch, M., Risi, W., and Wakili, K.G. (2007) Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species, *Journal of Wood Science*, 53:71-75.
- Kodur, V.K.R., Sultan, M.A., Latour, J.C., Leroux, P. and Monette, R.C. (2002) *Fire resistance tests on cellulose and glass fiber insulated wood shear walls*, National Research Council Canada.
- Lingens, A., Windeisen, E., and Wegener, G. (2005) Investigating the combustion behaviour of various wood species via their fire gases, *Wood Science and Technology*, 39: 49-61.
- White, R. H., and Nordheim, E. V. (1992) Charring rate of wood for ASTM E119 exposure, *Fire Technology*, 28(1): 5-30.
- White, R. H. and Dietsberger, M. A. (1999) Wood handbook—Wood as an engineering material, *CH17 Fire Safety*, Forest Products Laboratory.
- Yang, T.H., Wang, S.Y., Tsal, M.J., and Lin, C.Y. (2009) The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test, *Building and Environment*, 44: 231-236.

REFERENCES in English

- Hamada, M. (1953) Wood burning rate, *Proceedings of the Japan Society of Fire*, Vol.2(3): 11-12.
- Hugi, E., Wuersch, M., Risi, W., and Wakili, K.G. (2007) Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species, *Journal of Wood Science*, 53: 71-75.
- Kodur, V.K.R., Sultan, M.A., Latour, J.C., Leroux, P. and Monette, R.C. (2002) *Fire resistance tests on cellulose and glass fiber insulated wood shear walls*, National Research Council Canada.
- Lingens, A., Windeisen, E., and Wegener, G. (2005) Investigating the combustion behaviour of various wood species via their fire gases, *Wood Science and Technology*, 39: 49-61.
- Ministry of The Interior (2008) *Technical code for Design and Construction of Wood-framed Building*.
- Sugawara, S. (1978) Study of wood carbonization rate, *Summaries of technical papers of annual meeting Architectural Institute of Japan*.

- Tzeng, C.T. (2009) A Study on the test of the Fire-Resistance Performance on wood Bearing Wall, *National Science Council grants Research Paper Report*.
- Tzeng, C.T., Su, H.C., and Yeh, S.W. (2007) A Study of the Fire Resistance Performance on the Compartment Walls in Wood Platform Construction, *Journal of Architecture*, No. 59: 145-162.
- Tzeng, C.T. (2004) Framed Wall Construction Fireproof Function Verification, *ROC-Canada Cooperative Conference on Wooden Structure Architecture—Fire Resistance, Sustainability and Market, Conference Proceedings*: 81-90, The Representative Office of British Columbia Canada.
- White, R. H., and Nordheim, E. V. (1992) Charring rate of wood for ASTM E119 exposure, *Fire Technology*, 28(1): 5-30.
- White, R. H. and Dietenberger, M. A. (1999) Wood handbook—Wood as an engineering material, *CH17 Fire Safety*, Forest Products Laboratory.
- Yang, T.H., Wang, S.Y., Tsal, M.J., and, Lin, C.Y. (2009) The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test, *Building and Environment*, 44: 231-236.