

直交集成板(CLT)構造炭化率之研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

直交集成板(CLT)構造炭化率之研究

研究主持人：詹家旺

研究期程：中華民國 109 年 1 月至 109 年 12 月

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘 要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究目的.....	1
第三節 研究方法.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 直膠集成板(CLT)與防火規定.....	5
第二節 耐火試驗.....	14
第三節 木材高溫特性與炭化理論.....	17
第四節 木材炭化率預估模式.....	22
第三章 研究方法及實驗規劃.....	25
第一節 研究方法.....	25
第二節 實驗試體規劃設計.....	26
第四章 實驗結果與分析.....	33
第一節 CLT 樓板與牆實驗結果與分析.....	33
第二節 炭化深度與炭化率分析.....	43
第五章 結論與建議.....	49
第一節 結論.....	49
第二節 建議.....	50
附錄一 期初、期中及期末會議紀錄回覆.....	51
參考書目.....	59

表次

表 2-1 防火構造之建築物主要構造部分防火時效表.....	9
表 2-2 不同材種集成材燃燒實驗炭化深度.....	11
表 2-3 五種樹種大斷面集成材燃燒試驗之炭化深度與炭化速率.....	12
表 2-4 EU5 針對實木及集成材之密度所訂定之炭化深度速率.....	12
表 2-5 美國 NDS 所訂定之炭化深度速率.....	13
表 2-6 有效炭化速率和炭化層厚度.....	14
表 2-7 日本炭化預估模式彙整表.....	23
表 2-8 日本炭化預估模式計算結果表.....	24
表 3-1 CLT 之材料基本性質.....	27
表 3-2 CLT 樓板及牆耐火性能實驗試體規劃表.....	27
表 4-1 CLT 樓板及牆炭化深度與炭化速率實驗結果表.....	34
表 4-2 CLT-R1 樓板炭化深度量測結果.....	44
表 4-3 CLT-W1 及 CLT-W2 牆炭化深度量測結果.....	45

圖次

圖 1 研究流程圖	3
圖 2 CLT 面板配置方式.....	6
圖 3 CLT 板件配置橫截面示意.....	6
圖 4 CLT 板件配置橫剖和縱剖視圖.....	7
圖 2-1 標準升溫曲線.....	15
圖 2-2 木材熱解過程中熱與質量之轉換.....	18
圖 2-3 集成柱內部之溫度變化.....	19
圖 2-4 鋼鐵與木材強度變化比較圖(AITC).....	20
圖 2-5 木材燃燒炭化層.....	22
圖 3-1 CNS 12514-1、ISO 834-1 加熱溫度曲線.....	25
圖 3-2 小型多功能加熱試驗爐.....	26
圖 3-3 CLT 樓板及牆試體.....	28
圖 3-4 實驗試體測溫點佈設位置示意圖	29
圖 3-5 CLT 板材橫截面熱電偶佈設示意圖.....	29
圖 3-6 炭化深度量測位置示意圖.....	31
圖 3-7 厚度量測設備	31
圖 3-8 雷射測距儀.....	31
圖 4-1 樓板與牆非曝火面熱電偶及內部溫度(T1~T5、T-1-1~T-1-7)位置圖 ..	34
圖 4-2 試體內部溫度時間曲線圖	36
圖 4-3 非加熱面溫度及橫截面溫度時間曲線圖	37
圖 4-4 試體 CLT-R1 樓板實驗過程照片	39
圖 4-5 試體 CLT-R2 樓板實驗過程照片	40
圖 4-6 試體 CLT-W1 樓板實驗過程照片	41
圖 4-7 試體 CLT-W2 樓板實驗過程照片	42

圖 4-8 炭化深度量測結果.....	46
圖 4-9 炭化速率計算結果.....	46
圖 4-10 試體刮除炭化層後相片	47

摘 要

關鍵詞：直交集成板、炭化深度、炭化率

一、研究緣起

本研究透過蒐集歐洲、北美、日本等地有關直交集成板 CLT 之構造防火法規與規範，以直交集成板 CLT 之構造耐火試驗及防火特性進行探討研究，並針對木構造建築物防火設計施工參考手冊提出有關直交集成板 CLT 構造增修建議。預計進行 2 組 CLT 樓板及 2 組 CLT 牆板之耐火實驗，探討做為驗證所需。實驗試體使用 5 層 15cm 日本扁柏 CLT(符合 JAS 規定)及 5 層 12cm 日本扁柏加柳杉(符合 JAS 規定)分別進行樓板及牆各 1 小時及 2 小時之耐火實驗。CLT 實驗試體經耐火試驗後，進行炭化層之刮除以確認炭化深度及炭化速率。

CLT 實驗試體加熱面經清除炭化層後所殘留之結構斷面，以每 10cm 距離量測其縱向及橫向炭化深度值，將量測之炭化深度及炭化速率結果，以日本木材炭化率預估模式，係藉由公式之計算，與實際實驗後所得之炭化深度交叉比對分析，利用實驗數據與預估模式之相關係數討論公式預估之準確性，作為木構造結構設計之參考，以供未來規範修訂時之參考。

二、研究方法及過程

1. 文獻回顧法：蒐集歐洲、北美、日本等地有關直交集成板 CLT 之構造防火法規與規範，彙整國內外木材燃燒特性與炭化理論，整理分析木構材炭化率預估模式。於木構材炭化率部份，對木材燃燒特性、炭化理論與炭化率預估模式等相關資料彙整分析。
2. 實驗驗證法：擬定實驗計畫並規劃直交集成板 CLT 之炭化深度實驗，透過 1 小時及 2 小時之火害實驗確立不同材種之 CLT 樓板及牆板在加熱後之炭化深度。
3. 歸納分析法：透過文獻資料整理分析之木構材炭化率預估模式，依 CNS12514-1 規範所規定加熱曲線實驗後，分析實驗結果資料。在木構材炭化率部份，將依木構材加熱實驗炭化結果與炭化率預估模式相互比較分析，利用實驗數據與預估模式之相關係數討論公式預估之準確性，評估防火設計建議值。

三、重要發現

CLT 樓板及牆加熱實驗後，經清除炭化層後所殘留之結構斷面，量測炭化深度與炭化速率值，並經過整理與分析結果如下：

1. 實驗試體 CLT-R1 及 CLT-R2 尺寸 160×140cm，因採水平加熱方式溫度蓄積於試體加熱面底部，且 CLT 板材可燃物火載量大，因小型多功能爐排氣口位於底部排氣功能略顯不足，使得試體於 55 分鐘後加熱溫度均高於標準加熱溫度，實驗試體 CLT-W1 及 CLT-W2 尺寸 110×60cm 試驗結果亦相同，建議試體尺寸應縮減，樓板試體縮減為 160×30cm，牆試體縮減為 110×30cm，對於加熱 1 小時可滿足標準溫度加熱條件，但對於加熱 2 小時則須進一步實驗探討。
2. 炭化深度量測結果 CLT-R1 樓板平均炭化深度值為 64mm，平均炭化速率為 1.07mm/min；CLT-W1 牆平均炭化深度值為 62.7mm，平均炭化速率為 1.05mm/min；CLT-W2 牆平均炭化深度值為 97.1mm，平均炭化速率為 1.62mm/min，試體 CLT-R1 樓板及 CLT-W1 牆經 1 小時加熱試驗其炭化量測結果趨近，但均略高於文獻值 1 mm/min，研判係因實驗加熱過程初期 1 分鐘及第 55 分鐘後爐內溫度高於標準加熱溫度，導致炭化深度及炭化速率加快，CLT-W2 牆亦於第 55 分鐘後受爐內高溫影響加快炭化深度及速率。
3. 實驗結果炭化深度及炭化速率與日本炭化預估模式交叉比對雖可符合文獻設計手冊規定，但實際加熱實驗結果卻略高於理論值，研究顯示爐內加熱溫度應以可控制在標準加熱溫度曲線，避免受高溫影響其炭化深度及炭化速率。
4. 建議扁柏樹種直交集成板之炭化深度與炭化速率防火設計值，1 小時炭化深度防火設計值為 64mm，炭化速率防火設計值為 1 mm/min，2 小時部分因加熱爐內溫度偏高則須進一步實驗探討。

四、主要建議事項

建議一

可以依據 CLT 木構造炭化深度及炭化速率實驗結果研提木構造建築物設計及施工技術規範修正建議：立即可行建議

主辦機關：本部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

現行「木構造建築物設計及施工技術規範」第九章建築物之防火中第 9.3 節木構造防火設計定義木構造分為梁柱構件、框組壁式、原木層疊三類，建議增訂直交集成板 CLT 炭化深度與炭化速率。此項研究成果可供構造建築物設計及施工技術規範修正建議。

建議二

研擬直交集成板材不同樹種的炭化深度與炭化速率防火設計規範：中長期建議

主辦機關：本部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

本研究受限經費僅能進行日本扁柏之樓板及牆試驗，未能涵蓋國產柳杉、日本柳杉、北美 SPF、花旗松及歐洲雲杉等國際間常用材種，若未來能納入研究，則可涵蓋國際間常用樹種之炭化深度與炭化速率防火設計規範參考。

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

歐美日建築近幾年對木構技術與工法持續研究，其中縱橫多層次實木結構積材工法(Cross-Laminated-Timber)建材特性除了具有環保、節能、耐候、耐燃、防白蟻、組裝簡易、低碳排放、重量輕等優點之外，更可以突破傳統木構造建築的樓層限制，往高樓層發展，木構造建築在國際間蓬勃的發展，目前國內木構造建築的技術稍落後歐美日等國家，市場漸增的趨勢之下，相關木構造建築法規的修訂與技術的研究需求為當前的研究課題。

近年來，隨著我國木構造建築的迅速發展，建築結構形式多元化，木材雖然是可燃材料，但木材燃燒時形成的炭化層能夠充當絕緣體，有效阻止進一步燃燒，大大提高木材的耐火極限。在相同條件下，普通木結構的耐火阻燃值是鋼結構的 1.3 倍，水泥結構的 1.7 倍。其中以 CLT 新型木結構尤受重視，許多國家亦針對 CLT 結構耐火性能進行相關的試驗與研究，而我國目前對於 CLT 耐火性能研究尚處於探索階段，而世界各國正積極研訂 CLT 標準及適用之建築規範，然我國於 108 年 11 月 14 日修訂 CNS 16114 直交集成板國家標準，但國內木構造建築設計及施工規範因缺乏相關的試驗研究尚未將耐火性能標準納入，雖然產業界有 CLT 構造建築物的工程案例，但因現行法規的限制使得運用受限。由於現行木構造建築物施工及設計技術規範中缺乏有關 CLT 構造之相關內容，為將 CLT 構造防火設計納入建築法規，並確保 CLT 構造建築物防火安全，因此 CLT 結構耐火性能的研究具有重要的科研價值與意義，有必要針對此課題進行相關研究，以作為木結構防火設計建議依據。

第二節 研究目的

本研究之主要目的為蒐集歐洲、北美、日本等地有關直交集成板 CLT 之構造防火法規與規範。彙整國內外木材燃燒特性與炭化理論，整理分析木構材炭化率預估模式，並針對直交集成板 CLT 構造之炭化率特性進行探討。同時研提木構造建築物設計及施工技術規範增訂直交集成板 CLT 構造炭化深度防火規定建議值，

以期列為防火設計規範之制定參考。

本研究預期成果如下：

1. 探討直交集成板(Cross Laminated Timber)木構造特性，蒐集國際相關炭化率規範與文獻整理。
2. 研擬直交集成板(Cross Laminated Timber)木構造牆及樓板系統炭化率及炭化深度防火設計建議。

第三節 研究方法

本研究採用之研究方法整理如下：

1. 文獻回顧法：蒐集歐洲、北美、日本等地有關直交集成板CLT之構造防火法規與規範，彙整國內外木材燃燒特性與炭化理論，整理分析木構材炭化率預估模式。於木構材炭化率部份，對木材燃燒特性、炭化理論與炭化率預估模式等相關資料彙整分析。
2. 實驗驗證法：擬定實驗計畫並規劃直交集成板CLT之炭化深度實驗，透過1小時及2小時之火害實驗確立不同材種之CLT樓板及牆板在加熱後之炭化深度。
3. 歸納分析法：透過文獻資料整理分析之木構材炭化率預估模式，依CNS12514-1規範所規定加熱曲線實驗後，分析實驗結果資料。在木構材炭化率部份，將依木構材加熱實驗炭化結果與炭化率預估模式相互比較分析，利用實驗數據與預估模式之相關係數討論公式預估之準確性，評估防火設計建議值。

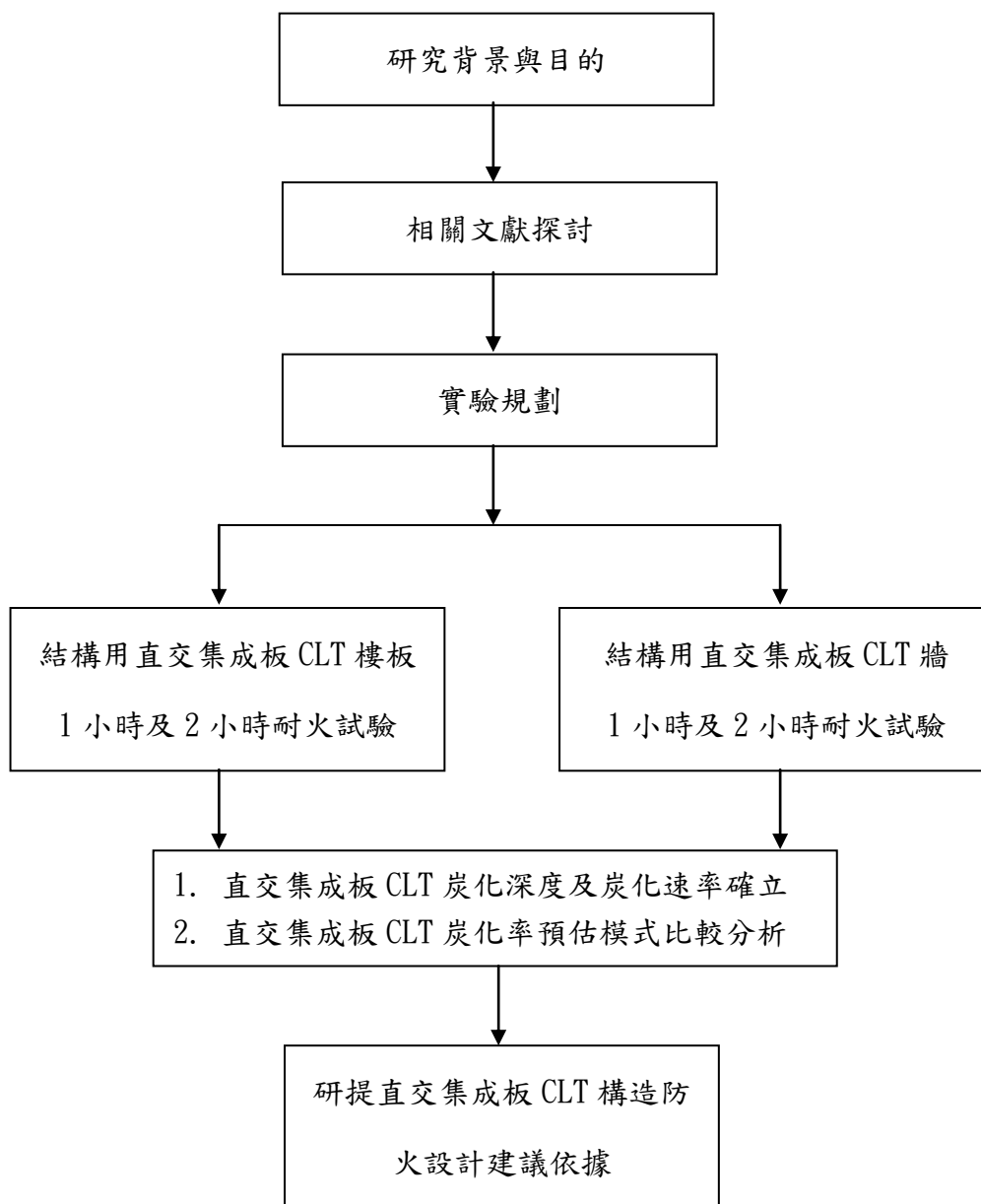


圖 1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 文獻回顧

第一節 直膠集成板(CLT)與防火規定

一、直膠集成板(CLT)特性

直交集成板為木條相互堆疊後，於高壓力下冷膠合製成的大型尺寸原木實心交疊木積材，以三、五、七層縱橫多層製成。積材的厚度有 5.7 公分至 60 公分，長度最長可至 16.5 公尺，寬度為 2.95 公尺。（依海運貨櫃尺寸限制，長度為 12.5 公尺、寬度為 2.35 公尺）。

1995 年開發出來的 CLT 新式工程結構木建材，CLT 集成員係以裁切分等的木條縱橫膠合製成。CLT 有很大的優勢，利用低，中，高檔木材交叉層壓（雙向）作用的木條減少在面板平面腫脹和收縮，同時大大提高整體承載能力。

膠合前，積材實木均經嚴格的檢驗分級，例如節塊、蟲蛀或其他異狀之材料都必須淘汰。因積材實木結構及尺寸之不同，縱橫積材原料之厚度可介於 19mm 至 40mm 之間，根據預期平衡濕度，經技術乾燥並膠合之實木條板的濕度為 $12\% \pm 2\%$ 。

CLT 交叉層積材是一種創新性的新型木質工程材料，由至少 3 層板材組成，每層結構由實木鋸材或結構用木質複合材平行膠合構成，且相鄰層按木材紋理相互垂直排列膠合。

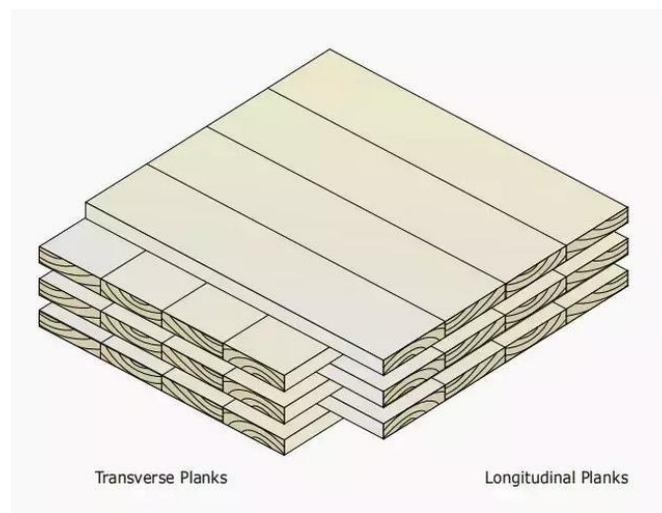


圖 2 CLT 面板配置方式

(資料來源：<https://kknews.cc/zh-tw/home/149m6pz.html>)

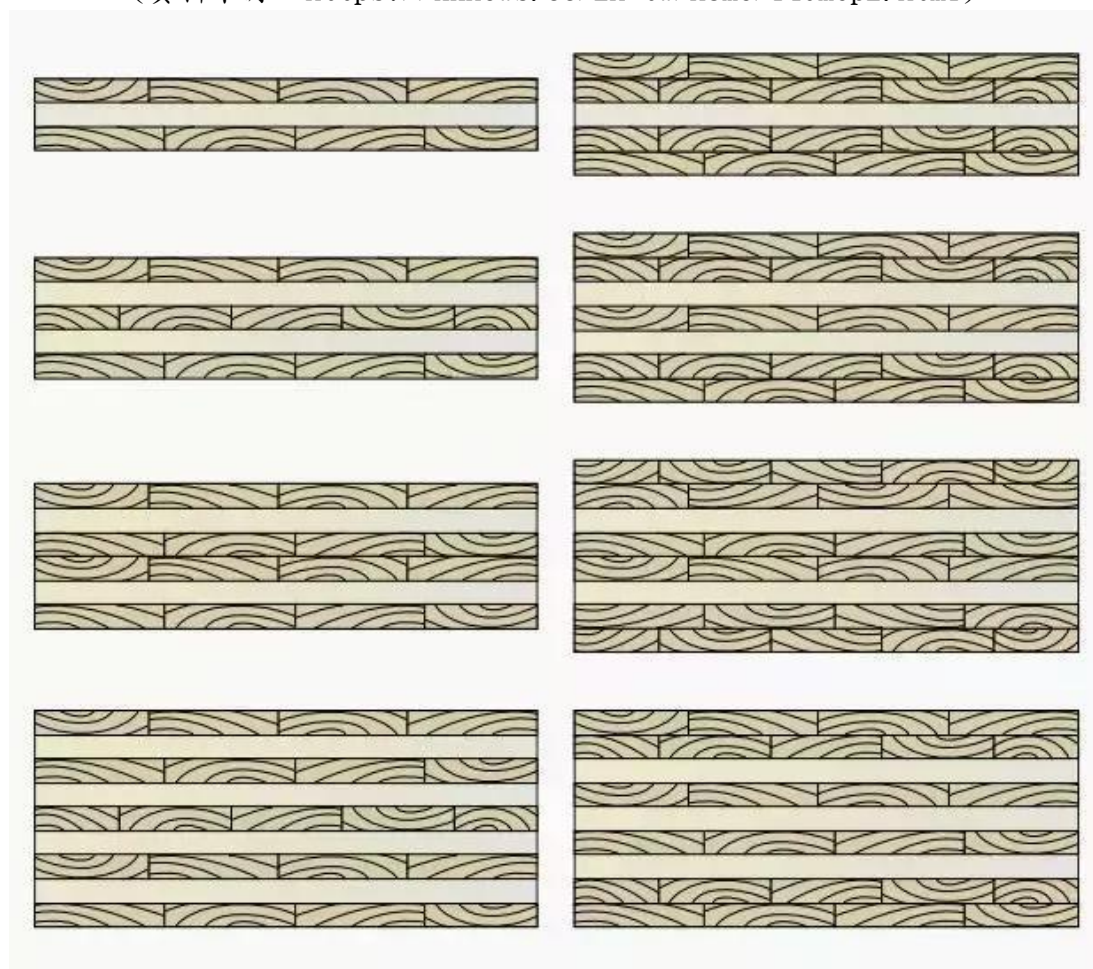


圖 3 CLT 板件配置橫截面示意

(資料來源：<https://kknews.cc/zh-tw/home/149m6pz.html>)

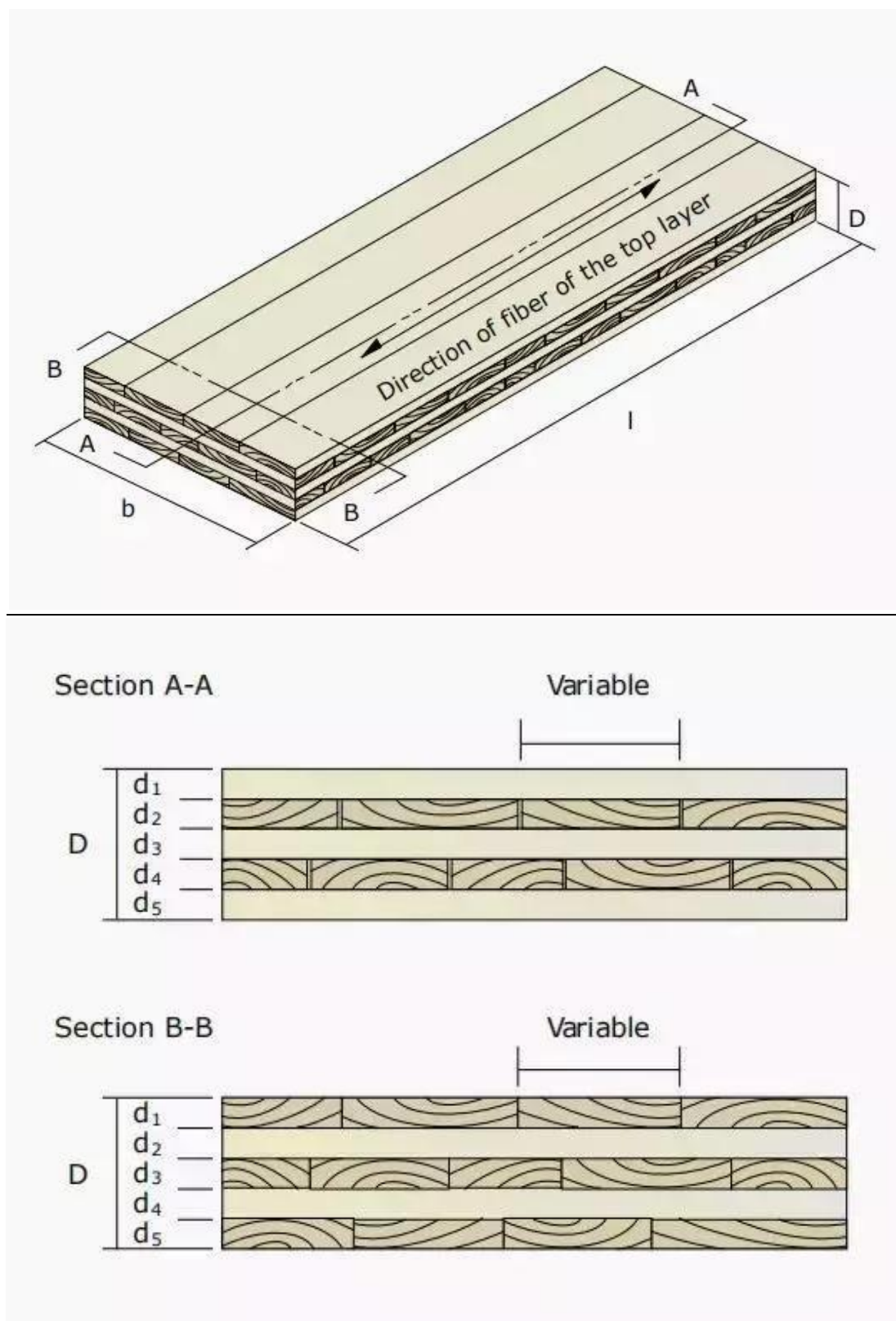


圖 4 CLT 板件配置橫剖和縱剖視圖

(資料來源：<https://kknews.cc/zh-tw/home/149m6pz.html>)

因為 CLT 相鄰層的正交結構，使其在材料主次方向均具有相同的乾縮濕脹性能，整體的線乾縮濕脹係數僅 0.02%，其尺寸穩定性是實木和膠合木橫紋的 12 倍。

在耐火性能上木材雖然是可燃材料，但木材燃燒時形成的炭化層能夠充當絕緣體，有效阻止進一步燃燒，大大提高木材的耐火極限。在相同條件下，普通木結構的耐火阻燃值是鋼結構的 1.3 倍，是水泥結構的 1.7 倍。與傳統的輕型框架構件相比，CLT 建築構件的截面尺寸較大，燃燒時表面炭化形成絕熱保護層，有效提高了其在火災中的承載力，且層板之間幾乎沒有空隙，火勢通過空氣間隙傳播的風險性顯著降低。

此外，相關研究表明，即總厚度一定的 CLT，其層板單元厚度越大，耐火極限越高。提高 CLT 層板單元厚度、增加層板數量，以及設置表層覆面(如石膏板)，均可提高 CLT 結構的耐火性。

CLT 建築中構件與構件之間的連接主要通過框架連接件配合緊固件來實現。除 CLT 層板本身剛度較高外，構件間的螺釘、鉸鏈等連接件與緊固件系統，使整體結構獲得良好的延性和耗能特性。

義大利與日本學者合作，對 3 層和 7 層實體 CLT 建築進行了震動試驗。3 層 CLT 建築經歷了 15 次地震模擬，仍然沒有出現嚴重的損害。7 層 CLT 建築在 14 次地震模擬後，亦保持足夠的結構強度和穩定性，X 軸方向偏移僅 1.3%，Y 軸方向偏移 1.0%。CLT 建築的抗震性能主要取決於連接件的性能。應用於低層建築，CLT 是重型結構材料，剛度高且不會發生斷裂現象；應用於高層建築，框架連接件的使用，可增強結構的中高層韌性和延展性，使得建築在承受地震荷載時能吸收大量能量，從而提高建築的抗震性能。

在隔音、保溫性能上建築的隔音和保溫性能越來越受到人們的重視。由於木材的低熱傳導性和 CLT 的連續大幅面特徵，可保證建築良好的氣密性和隔音保溫隔熱效果。CLT 具建造快和噪音低與傳統鋼筋混凝土結構相比，由於 CLT 可在工廠實現模塊化生產，預製成各類牆板、樓板及屋頂板。在現場進行組裝與建造，用以取代現澆鋼筋水泥製品和水泥預製板。因此其組裝快，工期短，同時建築現場噪音低，無污染，無建築垃圾產生，拆卸後可重新回用。可用於低、中層甚至

高層（20 層以上）的民用住宅和非民用建築，可完全代替傳統鋼筋混凝土和磚混結構，也可部分代替，與鋼筋混凝土等混合使用應用。

二、木構造防火規範

（一）國內規範

依「木構造建築物設計及施工技術規範－第九章建築物之防火」，相關防火規定整理如下：

1. 9.1一般規定

木構造建築物防火設計及施工，除應依建築技術規則建築設計施工編第三章規定外，其構造系統之防火設計依本章規定。

2. 9.2木構造建築物防火規劃基本原則之解說內容

木構造建築物依建築技術規則建築設計施工編規定，需考量必要之防火措施。

- a. 防火區劃設置規定如下：木構造建築物屬非防火構造者，依建築技術規則建築設計施工編第八十一條規定：其總樓地板面積應按每五〇〇平方公尺，以具有一小時以上防火時效之牆壁予以區劃分隔。
- b. 木構造建築物屬防火構造者其主要構造之柱、樑、承重牆壁、樓地板及屋頂之防火時效，依建築技術規則建築設計施工編第七十條規定。

建築技術規則建築設計施工編第七十條規定之防火時效如表 2-1

表 2-1 防火構造之建築物主要構造部分防火時效表

層數 主要構造部分	自頂層起算 不超過四層之各 樓層	自頂層起算超過 第四層至第十四層之 各樓層	自頂層起算 第十五層以上之各 樓層
承重牆壁	一小時	一小時	二小時
樑	一小時	二小時	三小時
柱	一小時	二小時	三小時
樓地板	一小時	二小時	二小時
屋頂	半小時		

（資料來源：建築技術規則）

建築技術規則建築構造編之第 171 條之 1 有關木構造建築物高度限制為「木構造建築物之簷高不得超過 14 公尺，並不得超過 4 層樓。但供公眾使用而非供居住用途之木構造建築物，結構安全經中央主管建築機關審核認可者，簷高得不受限制。」

綜合建築技術規則建築構造編第 171 條之 1 及設計施工編第 70 條，木構造建築物如為防火構造者，其全棟樓層數至多 4 層，簷高至高 14 公尺，且承重牆壁、樑、柱、樓地板等主要設備均須具 1 小時防火時效以上，屋頂防火時效須為半小時以上。

國內對木材炭化率之相關規範，於「木構造建築物設計及施工技術規範－第九章建築物之防火」中，9.3 對於木構造防火設計有相關之規定：

1. 梁柱構架

- (1) 構材之最小斷面應依防火時效設計，於時效內燃燒之殘餘斷面須符合結構設計承載能力所需之最小斷面尺寸規定。
- (2) 集成材 1 小時燃燒炭化深度設定為 50mm 以上，非集成材 1 小時燃燒炭化深度設定為 60mm 以上。

2. 原木層疊

原木層疊系統除依梁柱構架系統考慮炭化率計算構材之安全斷面與接合部依梁柱構架系統規定處理外，其餘依相關設計及施工規範處理。

而於該節次之解說中有關於梁柱構架系統防火設計如下：

柱、梁、間柱、橫撐木等主構架所使用的構材，若未設置防火被覆時，應預估防火時效內構材之燃燒炭化深度，設計適當之斷面尺寸，使於規定防火時效內燃燒之殘餘斷面(即安全斷面)仍具備結構應有之承載能力。木材之炭化深度，係假設炭化率(火災發生時，從木材表面向內部燃燒炭化之速率以mm/min表示)固定，將其乘上持續燃燒時間後求得。

在規範中以「CNS12514 建築物構造部份之耐火試驗法」進行 5 種材種集成材炭化深度實驗，燃燒時間為 30、60 分鐘，實驗結果如表 2-2。依實驗結果建議集成材 1 小時炭化深度設定為 50mm 以上，半小時為 25mm 以上，非集成材 1 小時炭化深度設定為 60mm 以上，半小時為 30mm 以上。若不依此數據設計，得採

用經中央主管機關認可之實際實驗值設計。如非採炭化深度設計之火災安全防護措施，則應經中央主管機關認可。

表 2-2 不同材種集成材燃燒實驗炭化深度

材種	實驗時間	側邊炭化深度 (mm)	底部炭化深度 (mm)	備註
杉木	30分鐘	20.0	23.5	1. 實驗方法採「CNS12514建築物構造部份之耐火試驗法」。 2. 試體三面受火。 3. 30分鐘實驗：試體斷面尺寸260 mm × 140 mm 4. 60分鐘實驗：試體斷面尺寸260 mm × 203 mm
	60分鐘	43.4	46.0	
柳杉	30分鐘	20.4	21.5	
	60分鐘	42.1	46.8	
台灣杉	30分鐘	22.7	23.5	
	60分鐘	45.4	49.0	
花旗松	30分鐘	19.2	20.8	
	60分鐘	37.4	37.9	
南方松	30分鐘	17.0	17.2	
	60分鐘	32.8	34.0	

(資料來源：木構造建築物設計及施工技術規範)

整理國內炭化率之相關研究，王松永教授與楊德新曾進行大斷面集成材燃燒炭化深度與炭化速率探討，使用杉木、柳杉、台灣杉、花旗松與南方松等樹種之集成元，製成兩種大斷面集成材，一種是由 2 英吋×6 英吋(38×140mm)之框組壁製材集成元，七層膠合而成 140mm×260mm(厚)大斷面集成材，另為 2 英吋×8 英吋(38×203mm)之框組壁工法製材集成元，七層膠合成 203mm×260mm(厚)之大斷面集成材，並且依照「CNS12514 建築物構造部分耐火試驗法」進行 30，45 與 60 分鐘加熱試驗，集成材含水率約 15%，每種條件重複 5 次，得到表 2-3 之結果。

表中可看出密度較小之杉木、柳杉與台灣杉集成材炭化速率約為 0.6-0.84mm/min 之間，而密度較大之花旗松與南方松集成材則炭化速率約在 0.53-0.69mm/min 之間。

表 2-3 五種樹種大斷面集成材燃燒試驗之炭化深度與炭化速率

樹種	密度 (g/cm ³)	加熱時間 (min)	炭化深度(mm)		炭化速度(mm/min)	
			側邊	底部	側邊	底部
杉木	0.40	30	21.3(2.6)	25.2(4.0)	0.71	0.84
	0.41	45	26.8(3.6)	32.6(2.9)	0.60	0.72
	0.42	60	43.4(5.7)	46.0(4.9)	0.72	0.77
柳杉	0.45	30	22.8(2.6)	23.6(2.2)	0.76	0.79
	0.44	45	32.9(3.9)	35.0(2.8)	0.73	0.78
	0.46	60	42.1(3.3)	46.8(3.1)	0.70	0.78
台灣杉	0.42	30	21.2(2.5)	21.8(2.1)	0.71	0.73
	0.44	45	28.7(2.7)	31.9(2.9)	0.64	0.71
	0.41	60	45.4(5.4)	49.0(3.5)	0.76	0.82
花旗松	0.50	30	19.2(2.9)	20.8(2.0)	0.64	0.69
	0.50	45	26.4(2.8)	30.3(2.4)	0.59	0.67
	0.53	60	37.4(4.2)	37.9(1.6)	0.62	0.63
南方松	0.52	30	17.0(2.0)	17.2(0.9)	0.57	0.57
	0.54	45	23.8(2.1)	26.2(2.1)	0.53	0.58
	0.54	60	32.8(4.2)	34.0(1.6)	0.55	0.57
*括弧內為標準差						

(資料來源：楊德新博士論文)

(二) 國外規範

1. EU5所定義之炭化深度計算方式(2-1)，可知針對實木及集成材之密度大於290 kg/m³，其炭化速率均可以表2-4之數值求得。

$$d_{char} = \beta_n t \quad (2-1)$$

d_{char} : 炭化深度 β_n : 炭化速率 t : 燃燒時間

表 2-4 EU5 針對實木及集成材之密度所訂定之炭化深度速率

Type of timber	β_0 mm/min	β_n mm/min
Glued laminated timber with a characteristic density of >290 kg/m ³	0.65	0.7
Solid timber with a characteristic density of >290 kg/m ³	0.65	0.8

(資料來源：歐洲EU5規範)

2. 美國NDS亦對有效炭化深度之計算方式及炭化速率提出相對應之數值(2-2及表2-5)，提供炭化深度之基本設計方式。

$$\beta_{eff} = \frac{1.2\beta_n}{t^{0.187}}$$

$$a_{char} = \beta_{eff}t = 1.2\beta_n t^{0.813} \quad (2-2)$$

表 2-5 美國 NDS 所訂定之炭化深度速率

Required Fire Resistance	Effective Charring Rate, β_{eff} (in./hr)	Visual Char Layer Thickness (in.)	Zero-strength Layer (in.)	Effective Char Layer Thickness, a_{char} (in.)
45 min (¾-h)	1.90	1.19	0.24	1.42
60 min (1-h)	1.80	1.50	0.30	1.80
90 min (1½-h)	1.67	2.09	0.42	2.50
120 min (2-h)	1.58	2.64	0.53	3.16

(資料來源：美國NDS規範)

3. 日本於2016年推出之CLT設計手冊中亦針對炭化速率提出相對應之計算方式。

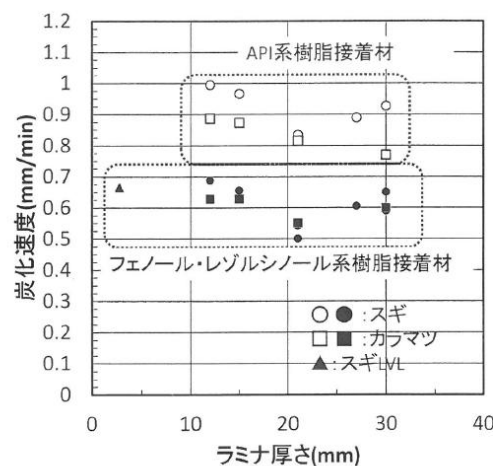


図 2.2.1-3 CLT パネルの炭化速度

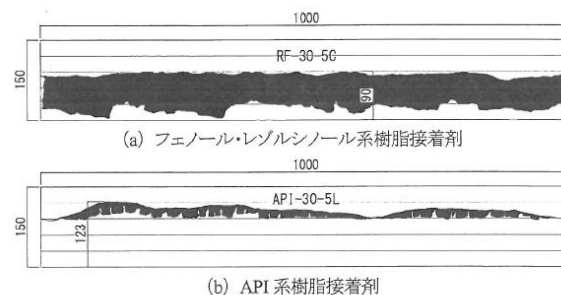


図 2.2.1-4 CLT パネルの炭化図

(資料來源：日本CLT用建築物設計與施工規範)

耐熱性較好-使用苯酚甲醛樹脂等作為接著劑的CLT樓板，炭化速率約為 0.7mm/min。

耐熱性較差-使用API系樹脂作為接著劑的CLT樓板，炭化速率約為 0.84~1mm/min。

4. 大陸 GBT 50708 膠合木結構技術規範亦針對炭化速率和炭化層厚度提出相對應之計算方式。

$$\beta_c = \frac{1.2\beta_n}{t^{0.187}} \quad (2-3)$$

β_c ：根據耐火極限 t 的要求確定的有效炭化速率(mm/h)。

β_n ：木材燃燒1.00h的名義線性炭化速率(mm/h)，採用針葉材製作的膠合木構件的名義線性炭化速率為38 mm/h。根據該炭化速率計算的有效炭化速率和有效炭化層厚度應符合表2-6的規定。

t ：耐火極限 (h)

表 2-6 有效炭化速率和炭化層厚度

構件的耐火極限 t (h)	有效炭化速率 β_c (mm/h)	有效炭化層厚度 T (mm)
0.50	52.0	26
1.00	45.7	46
1.50	42.4	64
2.00	40.1	80

(資料來源：GBT 50708 膠合木結構技術規範)

第二節 耐火試驗

依據103年11月公布的CNS 12514-1「建築物構造構件耐火試驗法-第1部：一般要求事項」進行加熱耐火試驗。

1. 加熱試驗

(1) 爐內溫度

爐內平均溫度應予以監測，使其符合下列關係式。

$$T = 345 \log_{10}(8t+1) + 20$$

式中 T = 加熱爐內平均溫度 (°C)

t = 加熱時間 (分)

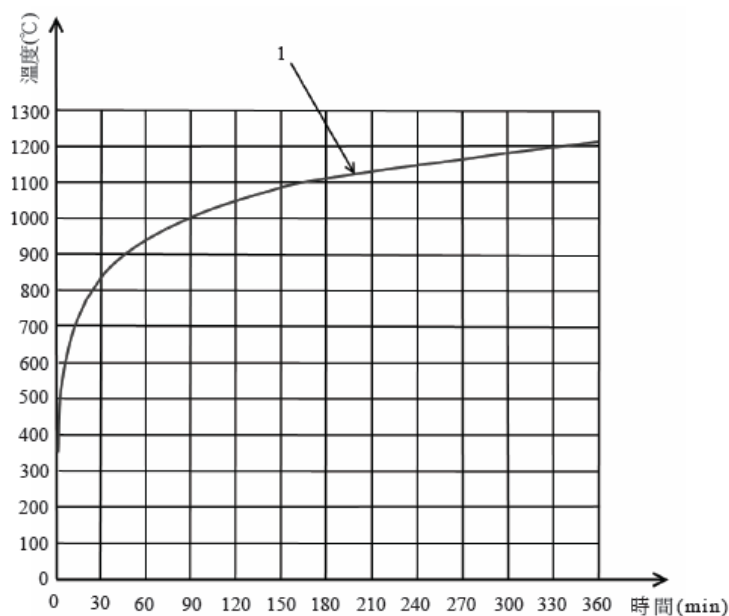


圖 2-1 標準升溫曲線
(資料來源：CNS 12514-1)

由規定的熱電偶所記錄的平均時間對溫度曲線下之面積，與標準時間對溫度曲線下之面積的偏差百分比（ d_e ）應在下列範圍內。

$$(1) \quad d_e \leq 15\% \quad 5 < t < 10$$

$$(2) \quad d_e = 15 - 0.5(t - 10)\% \quad 10 < t \leq 30$$

$$(3) \quad d_e = 5 - 0.083(t - 30)\% \quad 30 < t \leq 60$$

$$(4) \quad d_e = 2.5\% \quad 60 < t$$

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} \times 100 \quad (2-4)$$

式中，

d_e ：偏差百分比

A ：實際實驗平均時間對溫度曲線下之面積

A_s ：標準時間對溫度曲線下之面積

t ：時間（min）

所有面積應以相同的方式計算，在（1）以不超過 1 分鐘的區間加總面積，在（2）、（3）、（4）以 5 分鐘的區間加總面積，且應從時間為零開始計算。

試驗開始 10 分鐘以後，爐內熱電偶所記錄的溫度不得與對應的標準時間曲線之溫度相差超過 100°C 。對於含有顯著數量可燃材料之試體，當超出偏差可清楚地被鑑定初是由明顯數量可燃材料的突然引燃增加了平均爐內溫度，超出許可差時間不得持續超過 10 分鐘。

(2) 爐內壓力

- (a) 加熱爐內高度方向之氣壓分布大概呈線性梯度狀態，設定該壓力梯度平均值為 8 Pa/m 。
- (b) 爐內控制壓力的平均值，在試驗開始初期 5 分鐘應保持在 $\pm 5\text{ Pa}$ ，至 10 分鐘時須保持在 $\pm 3\text{ Pa}$ 。

2. 加載試驗

對承重構造試體，試驗載重須在試驗開始之前至少 15 分鐘加載至試體，並保持加載不變直至變形不再增加。接著在試驗過程中持續加載，載重仍須保持不變，且當試體發生進一步變形時，加載系統應有即時反應能力，以保持穩定之加載值；亦即須具有補償試體最大容許變形之能力。

試驗開始前室內氣溫及試體之初始平均內部溫度及非加熱面溫度須在 $25\pm 15^{\circ}\text{C}$ 範圍內，爐內溫度須小於 50°C 。試驗開始前 5 分鐘內，所有熱電偶之初始值須持續記錄並檢查一致性。試體之變形量測值及其他狀態亦須記錄。

3. 加熱試驗結束

試驗因下列原因得以終止。

- (1) 達到設定指標：試驗中試體已超過性能基準，試驗得立即停止；或試驗時間已達預定時間，亦得停止。試驗中試體發生失敗情況後，為獲得額外的資料可繼續試驗。
- (2) 因人員安全或設備可能遭受破壞之因素，試驗須立即停止。
- (3) 因試驗委託人之要求，得停止進行試驗。

4. 性能基準

試體的防火性能應由下列適當之性能基準決定。此為試體在試驗過程中維持支承試驗載重能力所經過的時間。試驗載重的支承能力以變形量及變形速率兩者決定。

當超過以下兩項基準時視為破壞。

(a)對於撓曲構件。

最大撓曲量， $D = \frac{L^2}{400d}$ (mm)

且最大撓曲速率， $\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9,000d}$ (mm/min)

式中，L：試體之淨跨度(mm)

d：試體構造斷面之壓縮側緣至拉伸側緣之距離(mm)

(b)對於軸向承載構件：

最大軸向壓縮量， $C = \frac{h}{100}$ (mm)

且最大軸向壓縮速率， $\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1,000}$ (mm/min)

式中，h：為初始高度(mm)

第三節 木材高溫特性與炭化理論

一、木材之高溫特性

一般人們在評價木質系建築物之防、耐火性能時，首先考量者即是木材會燃燒這個問題，事實上，木材因是有機物質，所以本質上就會燃燒。因為會燃燒，故大多數人都有「木材對火之抵抗是較弱」的觀點，並不會進一步瞭解到木材燃燒產生之炭化層宛如防火被覆層保護著下面的健全木材。

像木材這種具多孔性炭層在火災中之熱解過程相當複雜。圖 2-2 為木材在熱解過程中之主要物理與化學現象。乾燥之木材會隨溫度增加而增加直至纖維開始降解。大約在 200-250°C，熱降解開始發生。揮發物包含可燃的混合氣體、水汽與焦油等，爾後，固體炭化層產生，其體積小於原來木材尺寸，而炭化層的爆裂

與裂縫的形成將會影響火焰與固體間熱與物質之轉換。揮發出之可燃氣體與表面周遭之空氣混合，會再繼續進行燃燒。在此過程下，氧氣會於表面四散，而使炭化層氧化，由於炭化層之收縮與氧化，將使燃燒過程減退。

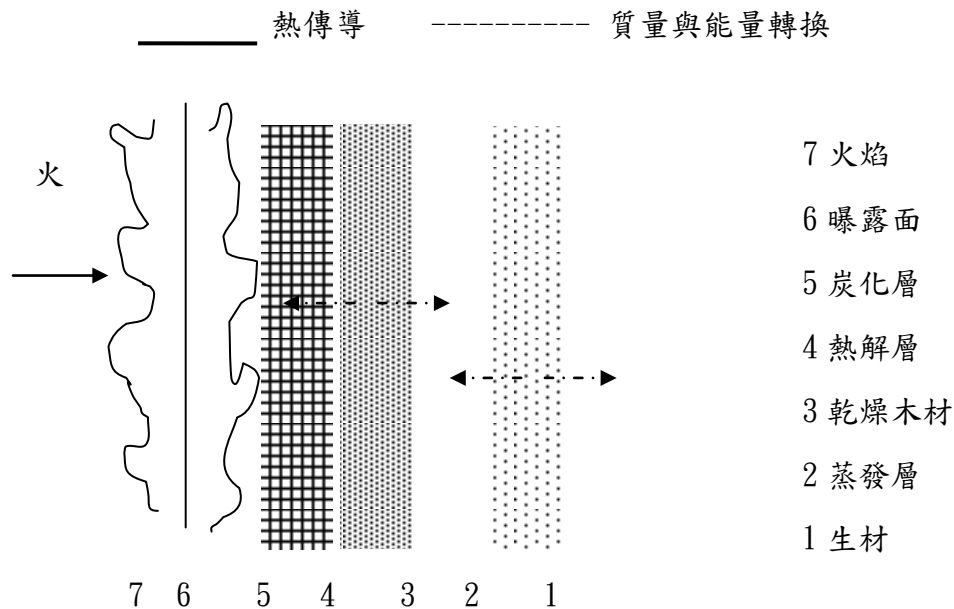


圖 2-2 木材熱解過程中熱與質量之轉換

（資料來源：Janssens, 2004）

在一般使用下，木材通常含有一定程度之含水率，當暴露在火災情況下，木材的溫度將會上升至某一點使木材本身所含有之水率蒸散，由於木材水分會存在於細胞壁中，因此這些水分之蒸發需要比去除自由水需要更多的能量，且溫度可能需超過 100°C 才會發生。即當木材被加熱時，首先會釋出所含有之水分，再經熱分解、發焰燃燒及赤熱燃燒以致毀損。當溫度超過 100°C ，木材即受熱分解，而溫度上昇至 $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$ 之間時，木材之分解速率減緩，水氣蒸發出來且伴隨著一氧化碳與二氧化碳，此時木材便逐漸破壞或熱解。當溫度超過 200°C 時，熱解作用便很快產生，當溫度上昇至 $260\text{--}350^{\circ}\text{C}$ 時，熱解作用便加速，並產生一些可燃性氣體，這些氣體不僅可助燃，當溫度高實亦會自燃，一般而言，當溫度超過 270°C 時，熱量足以使可燃性氣體燃燒。簡言之，木材加熱時，從 200°C 附近會急速減低重量之同時會產生可燃性氣體，氧化結果在 300°C 附近會發生熱量。在此階段接近火口時會引火，因此被稱為引火點，日本之防火試驗是以 260°C 當作火災危險溫度，作為防火工學上之評價判定基準。更繼續加熱時，在 500°C

附近會自然發火，殘留灰分而消滅。但是在缺乏氧氣狀態下，進行加熱時，會發生無氧化發熱之熱分解，而形成所謂的木炭。因此若只焦點放在所謂的「可燃燒」時，確實是可將木材視為其對於火之抵抗會較弱。但是，作為構造材料時，考量其對於熱所引起之強度減低，或火焰之遮斷性時，這樣的評價則並不一定正確。

二、大斷面木質材料之燃燒特性

木材在表面著火、燃燒時，在燃燒部分會形成炭化層。此炭化層會遮斷木材燃燒之必要氧氣之供給，同時具有將炭化層內層之健全部分從高溫加熱加以保護之斷熱性。另外，木材本身之熱傳導率低（只為混凝土之約 1/10），且木材即使為氣乾狀態亦含有相當多之水分，因此大斷面之木材燃燒時，燃燒至木材內部需要花相當長時間。

圖 2-3 為集成柱進行標準加熱溫度曲線加熱燃燒時，其內部溫度之變化。由圖可知，木材表面既使受高溫加熱，木材之內部溫度也不容易上昇，尤其斷面之中央部經過長時間大概可保持常溫狀態。

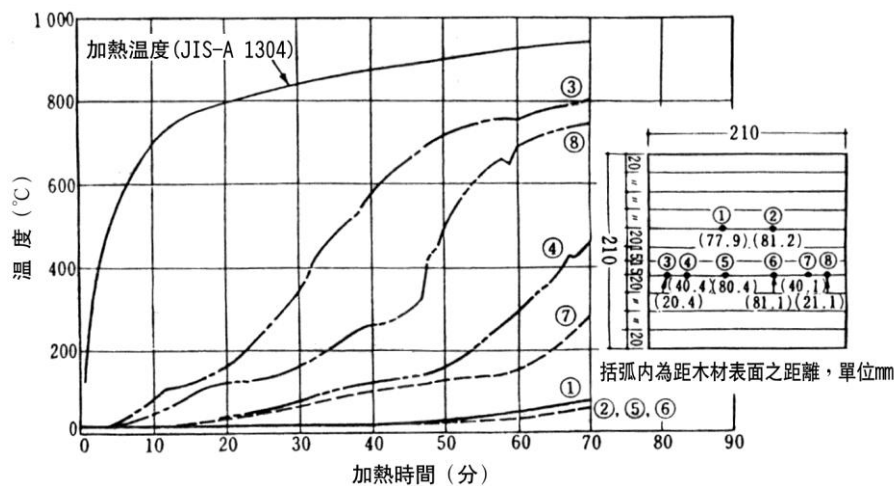


圖 2-3 集成柱內部之溫度變化

（資料來源：中村賢一與山田誠，1998）

由於集成材之耐火耐熱性良好，因此在燃燒 30 分鐘之後，集成材僅僅損壞其外圍約 19 mm，而不似鋼筋會彎曲變形（圖 2-4）。值得一提的是，大多數大型之集成材在著火之後，其組織仍完好，仍然能支撐載重，故可防止建築物之變形、崩壞，所以集成材構造被視為防火優異之構造。

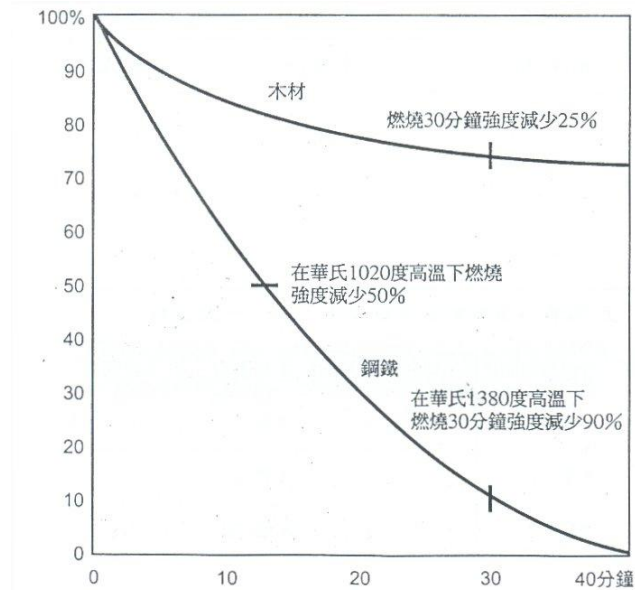


圖 2-4 鋼鐵與木材強度變化比較圖(AITC)

(資料來源：內政部建築研究所，木構造防火技術規範與集成材炭化特性之研究)

木材經過火災加熱時，外層會產生炭化層，而炭化層之形成與炭化速度有關，事實上，炭化速度在集成材之防火設計上相當重要，因為它決定了集成材的斷面尺寸，以及集成材需要多少時間將降低至最低強度。

依據國外研究資料，在 ASTM E119 標準火災試驗下，中密度針葉樹集成材的炭化速率為 0.6 mm/min。而由 CAN/ULC S 101、ISO 834、BS 476:Part 20 所得之炭化速率亦大致相同，因為這些標準的溫度-時間曲線亦大致相似。國外以往研究結果很多，以下列舉部分供參考。

在大斷面木材結構之火災安全設計上，Lie (1977) 建議輕質乾燥的木材使用 0.8 mm/min 之炭化速率，中密度的針葉樹材使用 0.6 mm/min 之炭化速率，大斷面的含水材則使用 0.4 mm/min 之炭化速率。

Lawson et al (1952), Vorreiter (1956), Schaffer (1961), White (1988) 曾依據下式提出木材炭化之相關經驗模式。

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \eta_1 t^{\eta_2} \quad (2-5)$$

其中 x 為炭形成位置， $\frac{\partial x}{\partial t}$ 為炭形成之瞬間速率， t 為時間， η_1 與 η_2 為迴歸

常數， n 則決定於炭化速率隨時間之增加是增加 ($n > 0$) 維持 ($n = 0$) 或減少 ($n < 0$)。而這些經驗模式包含了木材特性如熱傳導性、密度、含水率等，表 1 比較了這些模式之差異。

日本方面亦很早即開始從事有關於集成材炭化速度之研究，井上嘉幸(1972)將大斷面之集成材置入試驗用加熱爐，加熱 30 分鐘達到 840 °C 時，外圍部分之炭化深度約為 2 cm，由於熱之炭化速度，平均每分鐘炭化 0.6-0.7 mm，如此斷面尺寸之減少緩慢，故外圍雖經炭化，但內部尚能保持健全。中村賢一等(1985)針對大斷面集成材樑進行燃燒試驗，指出椴松集成材之炭化速度為 0.55~0.60 mm/min。中村賢一與山田誠(1998)針對美國鐵杉集成材、日本柳杉集成材與日本北海冷杉集成材進行燃燒試驗，指出其炭化速度分別為 0.58~0.77 mm/min、0.55~0.63 mm/min 與 0.54~0.69 mm/min。左野敦子等(2001)針對構造用集成材之炭化試驗指出，將試體置於 ISO 834 之標準加熱曲線所制訂之時間加熱，結果柳杉集成材之炭化速度為 0.74-0.84 mm/min。

三、木材炭化理論

依據「CNS14651 建築物防火辭彙—一般火災現象用語」中，對「炭化(char)」之定義說明為在熱裂解或不完全燃燒期間形成炭樣物質之過程。炭化率可以定義為單位時間所形成之炭化深度，一般稱之為炭化速度，常用的表示單位為 mm/min。

木材表面著火、燃燒時，在燃燒部分會形成炭化層。此炭化層會將木材燃燒所必要的氧氣遮斷，同時炭化層具有斷熱性可保護內層之健全部分。木材燃燒後炭化會從表面向內部進行速率稱為炭化速率，大斷面木材於標準加熱條件下所得到的炭化速率約為 0.6~0.8mm/min，炭化速率與加熱時間的乘積即為炭化深度。

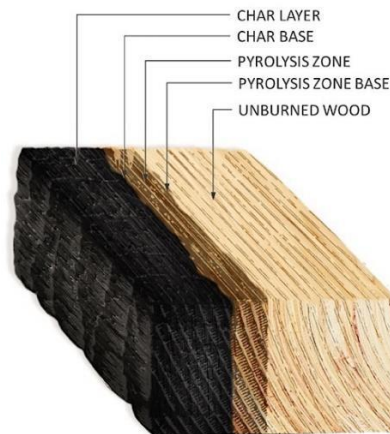


圖 2-5 木材燃燒炭化層

(資料來源:內政部建築研究所,木構造防火技術規範與集成材炭化特性之研究)

炭化深度可使用於評估木材構件受火害時之殘留斷面,以殘留斷面支持設計載重,防止構架倒壞。木材之炭化速度是除受加熱溫度條件影響外,亦與樹種、比重、含水率、斷面之大小等有關係。一般比重大之木材較難燃燒,而斷面愈大木材內部溫度上昇較慢,亦較難於燃燒,因此其炭化速度會較緩慢。

第四節 木材炭化率預估模式

木材炭化率預估模式,係藉由公式之計算,預估木材在燃燒時之炭化深度,作為木構造結構設計之參考,在美國的木材製品大部分是規格化產品,因而著重產品本身的耐火性能是否滿足防火時效規定。日本的作法則在木結構設計時,計算木構材本身容許應力所需之斷面尺寸,並在該斷面外加一層炭化深度,確保木構材滿足防火時效規定。

(一) 日本木材炭化率預估模式

當木材受到加熱燃燒時,依日本學者濱田稔之實驗研究,整理獲得表 2-7 之木材炭化速度預估模式。

表 2-7 日本炭化預估模式彙整表

背景條件與炭化預估模式	模式參數解釋	來源
在一定溫度，無氣流中之加熱(採用氣乾木材)。 杉木：$x = 1.00(\frac{Q}{100} - 2.5)\sqrt{t}$(2-6) 松木：$x = 0.78(\frac{Q}{100} - 2.5)\sqrt{t}$(2-7) 檜木：$x = 0.6(\frac{Q}{100} - 2.5)\sqrt{t}$(2-8)	x = 炭化深度(mm) t = 加熱時間(min) Q = 加熱溫度 (°C)	濱田稔
採用火災溫度標準曲線，在本生燈(Bunsen Burner)氣流中加熱。 杉木：$x = 1.24(t - 4)^{1.152} \cdot \lambda^{-0.0384(t-4)}$ (2-9) 松木：$x = 1.35(t - 4)^{1.338} \cdot \lambda^{-0.0446(t-4)}$ (2-10) 檜木：$x = 1.24(t - 4)^{1.140} \cdot \lambda^{-0.038(t-4)}$ (2-11) 惟 $4 \leq t \leq 20$, (時間限制在 4-20 分鐘範圍內)	x = 炭化深度(mm) t = 加熱時間(min)	濱田稔

(資料來源：本研究整理)

舉例說明，依公式(2-6)、(2-7)、(2-8)之計算，假設使用 CNS12514-1 加熱條件，時間設定 20、30、60 分鐘，加熱溫度分別為 781 度、842 度、945 度，計算結果詳如表 2-8。

表 2-8 日本炭化預估模式計算結果表

樹種	加熱時間(分)	加熱溫度(℃)	炭化深度(mm)	炭化速度(mm/min)
杉木	20	781	23.75	1.19
	30	842	32.43	1.08
	60	945	53.83	0.90
松木	20	781	18.52	0.93
	30	842	25.29	0.84
	60	945	41.99	0.70
檜木	20	781	14.25	0.71
	30	842	19.46	0.65
	60	945	32.30	0.54

(資料來源：本研究整理)

而依公式(2-9)、(2-10)、(2-11)之計算，依資料來源說明，當燃燒時間為 20 分鐘時，杉木炭化深度 34mm，松木炭化深度 20mm，檜木炭化深度為 19mm。

(二) 美國木材炭化率預估模式

木材炭化率預估模式，其加熱條件採 ASTM E119 標準溫度—時間曲線，依公式(2-12)進行計算，炭化係數則依公式(2-13)計算。

$$t = m x_c^{1.23} \dots\dots\dots(2-12)$$

t = 木材燃燒時間(分)

m = 炭化係數

x_c = 炭化深度(mm)

$$m = -0.147 + 0.000564 \rho + 1.21\mu + 0.532 f_c \dots\dots\dots(2-13)$$

ρ = 木材密度(kg/m³)

μ = 木材含水率(%)

f_c = 木材炭化減少率(加熱後的炭化層厚度除以炭化木材原本的厚度)

透過以上公式(2-13)的計算，代入公式(2-12)，即可求得木材之炭化深度。

第三章 研究方法及實驗規劃

第一節 研究方法

木材遇火容易被引燃，是為易燃材料，因而不易被接受用於防火構件，實際上木材在溫度達到 250 °C 以上時，木材才會燃燒(木材發火點約在 260-275 °C)。一旦木材著火，表面著火層會形成一層炭化層，炭化層將木材與外界火勢隔離。以一場持續 30 分鐘的火災中膠合集成材耐火性為例，每受火表面只有幾毫米因炭化而損失，在此炭化層的保護下，只會緩緩地產生強度的損失，絕大部分原始的橫斷面則完整無損。目前國際間標準加熱溫度曲線有 ISO 834-1，我國使用之 CNS12514-1 加熱曲線係依照 ISO 834-1 進行，所以本研究預計採用國內 CNS 12514-1 之加熱溫度曲線，進行 2 組 CLT 樓板及 2 組 CLT 牆板之耐火實驗，探討做為驗證所需。實驗試體使用 5 層 15cm 日本扁柏 CLT(符合 JAS 規定)及 5 層 12cm 日本扁柏加柳杉(符合 JAS 規定)分別進行樓板及牆各 1 小時及 2 小時之耐火實驗。CLT 實驗試體經耐火試驗後，進行炭化層之刮除以確認炭化深度及炭化速率。

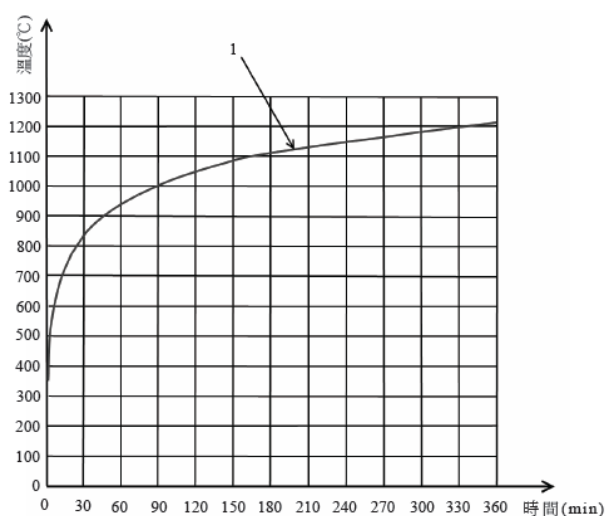


圖 3-1 CNS 12514-1、ISO 834-1 加熱溫度曲線

(資料來源：CNS 12514-1)

CLT 實驗試體加熱面經清除炭化層後所殘留之結構斷面，以每 10cm 距離量測其縱向及橫向炭化深度值，將量測之炭化深度及炭化速率結果，以日本木材炭化率預估模式，係藉由公式之計算，與實際實驗後所得到之炭化深度交叉比對分析，利用實驗數據與預估模式之相關係數討論公式預估之準確性，並提出國內炭化深度設計值，以供未來規範修訂時之參考。

第二節 實驗試體規劃設計

本研究主要使用內政部建築研究所防火實驗中心之小型多功能加熱試驗爐試驗設備，主要針對建築物防火構造及防火設備之耐火性能研究實驗設施。



圖 3-2 小型多功能加熱試驗爐

(資料來源：本研究整理)

一、試體設計

1. 試驗時間：加熱1 小時及 2 小時試驗。
2. 試體整體尺寸設計：(1)CLT樓板為1.4m×1.6m；
(2)CLT牆為1.1m×0.6m。
3. 試體厚度：(1)CLT樓板集成元層數為5層，每層厚度3cm，總厚度為15cm；
(2)CLT牆集成元層數為5層，每層厚度2.4cm，總厚度為12cm。
4. 組成材料：實木板製作之直交集成板，膠合劑為水性高分子異氰酸脂。
5. 以實木板料(集成元)相鄰排放，於上方佈膠之後再鋪上與前一層呈90度的實木板料，共分有3、5、7、9層的直交集成板，可依需求生產最寬3000mm，長度最大12000mm之各種尺寸，厚度120~300mm的樓板，並以模組化的方式安裝。

二、試體規劃

實驗試體預計進行 2 組 CLT 樓板及 2 組 CLT 牆板之耐火實驗，實驗試體使用 5 層 15 cm 日本扁柏 CLT(符合 JAS 規定)及 5 層 12 cm 日本扁柏(上、下外層)+柳杉(內層)(符合 JAS 規定)分別進行樓板及牆各 1 小時及 2 小時之耐火實驗，其材料基本性質詳列如表 3-1。

表 3-1 CLT 之材料基本性質

項目	日本扁柏CLT(15cm, 5層)	日本扁柏(上、下外層)+柳杉(內層)CLT(12cm, 5層)
密度(g/cm ³)	0.49	0.49
含水率(%)	11.5	11.5
抗彎強度(MPa)	37.4	37.4
抗彎彈性模數(GPa)	8.7	8.7
膠合剪力(MPa)	3.8±0.9	3.8±0.9
木破率(%)	100±0	100±0

(資料來源：本研究整理)

實驗試體總計有 4 組，材料之組構如試體規劃表，如表 3-2 所示。

表 3-2 CLT 樓板及牆耐火性能實驗試體規劃表

試體編號	CLT 板材	層數	每層厚度 (cm)	總厚度 (cm)	試體尺寸 (cm)	膠合劑
CLT-R1	樓板	5	3	15	160×140	水性高分子 異氰酸脂
CLT-R2	樓板	5	3	15	160×140	水性高分子 異氰酸脂
CLT-W1	牆	5	2.4	12	110×60	水性高分子 異氰酸脂
CLT-W2	牆	5	2.4	12	110×60	水性高分子 異氰酸脂

(符合日本 JAS 2013 年 12 月 20 日頒布的“直交集成板の日本農林規格”規定)

(資料來源：本研究整理)



圖 3-3 CLT 樓板及牆試體

(資料來源：本研究整理)

三、實驗條件設定

1. 實驗試體測溫點位置佈設

樓板及牆試體非加熱面測溫點佈設參照CNS 12514-1第8.1.2 節規定水平或垂直分隔構造之試驗，非加熱面溫度測點數量不得少於5個，其中1個位於試體中心，以及試體四等分面積中心如圖3-4所示，另距試體中心位置右側5公分處佈設7測溫點，每間隔15mm鑽孔埋設熱電偶測溫點，分成第5層(靠近火源層)測溫點T-1-1，第5層中間處測溫點T-1-2，第4層與第5層膠合處測溫點T-1-3，第4層中間處測溫點T-1-4，第3層與第4層膠合處測溫點T-1-5，第3層中間處測溫點T-1-6，第2層與第3層膠合處測溫點T-1-7，針對CLT板材橫截面佈設測溫點，以測量炭化前到達每一層的膠合處及中間處所需的時間如圖3-5所示。利用7mm的鑽孔器，用綁線的方式標示出鑽孔深度後，開始依序鑽孔；鑽孔後放入些許木屑，避免防火膠包覆測溫端部，造成量測阻礙，最後再灌入防火膠填塞。所有熱電偶之測點應避免安置距熱橋、結點、搭接及貫穿接合處，以及螺栓或螺釘等固定件之位置50mm以內，還有可能使熱電偶暴露於穿越試體熱氣直接影響之位置。試體非曝火面熱電偶不應設置於距離試體邊緣100mm以內的位置。

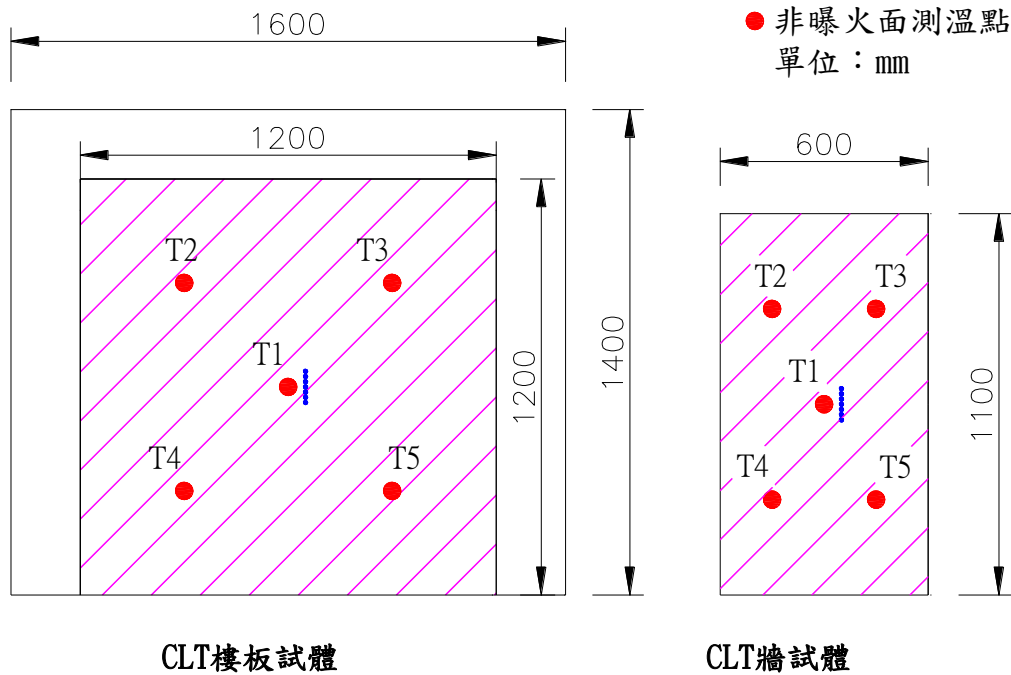


圖 3-4 實驗試體測溫點佈設位置示意圖

(資料來源：本研究繪製)

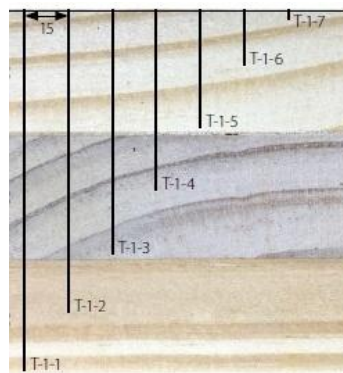


圖 3-5 CLT 板材橫截面熱電偶佈設示意圖

(資料來源：本研究規劃)

2. 實驗加熱條件設定

(1) 加熱條件：

實驗之加熱溫度參考 CNS 12514-1 第 6 節之規定內容，時間為 1 小時及 2 小時。

加熱試驗時爐內溫度由 CNS 12514-1 中規定熱電偶所得之爐內平均溫度如圖 3-1 應予以監測，使其符合下列關係式。

$$T=345 \log_{10} (8t+1) +20$$

式中 T = 加熱爐內平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)

t = 加熱時間 (分)

(2) 爐內壓力設定：樓板為20 Pa、牆為5 Pa。

- a. 加熱爐內高度方向之氣壓分布大概呈線性梯度狀態，雖然此壓力梯度會因為爐內溫度的改變稍有變化，但在評估爐內壓力狀態時，可假設該壓力梯度平均值為 8 Pa/m。
- b. 在特定高度的爐內壓力值應為標稱平均值，不考慮紊流等相關因素所造成的壓力不穩定波動，且以相對於爐外相同高度的壓力值表示。爐內控制壓力的平均值應依據 CNS 12514-1 9.4.2 執行監視，在試驗開始初期 5 min 應保持在 ± 5 Pa，至 10 min 時須保持在 ± 3 Pa。
- c. 垂直構件，原則上從試體底端起 500 mm 高度處之壓力值應為零(中性壓力面)；但試體最頂端壓力不得大於 20 Pa，因此壓力平面的高度應隨之調整。
- d. 水平構件，爐內壓力應於是體下方 100 mm 或測試梁構件時應於天花板水平面下方 100 mm，其控制壓力應為 20 Pa。

3. 炭化深度量測方式

CLT 實驗試體經耐火試驗後，進行炭化層之刮除以確認炭化深度及炭化速率。CLT 實驗試體加熱面經清除炭化層後所殘留之結構斷面，以每 100mm 距離量測其縱向及橫向炭化深度值如圖 3-6，其厚度量測設備如圖 3-7 及圖 3-8 雷射測距儀所示，即可得知平均炭化深度值(mm)及平均炭化速率值(min/mm)。

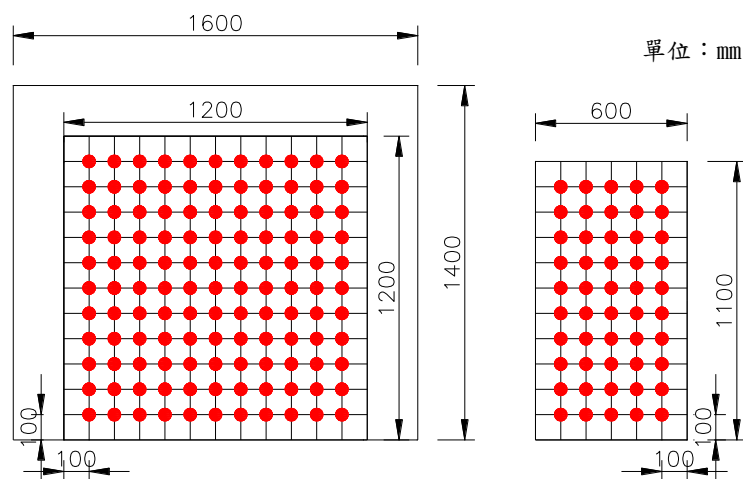


圖 3-6 炭化深度量測位置示意圖
(資料來源：本研究繪製)



圖 3-7 厚度量測設備
(資料來源：本研究整理)



圖 3-8 雷射測距儀
(資料來源：本研究整理)

第四章 實驗結果與分析

第一節 CLT 樓板與牆實驗結果與分析

CLT 樓板與牆實驗試體規劃係依據 3-2 節設計，參考「CNS12514-1 建築物構造構件耐火試驗法—第 1 部：一般要求事項」相關樓板與牆構造部分之試驗規定，並依規範中標準加熱溫度—時間曲線作為樓板與牆試體之加熱條件，進行 CLT 木構造樓板與牆之耐火實驗，加熱實驗後量測其炭化深度與炭化速率值。

一、實驗程序

1. 實驗開始

室內氣溫須在 $(25\pm 15)^{\circ}\text{C}$ 範圍內。試驗開始前 5 min 內，所有熱電偶之初始值須持續記錄並檢查一致性。試體之變形量測值及其他狀態亦須記錄。

試驗開始之際，試體之初始平均內部溫度及非加熱面溫度須為 $(25\pm 15)^{\circ}\text{C}$ 。

開始試驗前，爐內溫度須小於 50°C 。當溫度控制程式依循標準加熱曲線開始之際即視為試驗開始。從該點時間起量測經過時間，所有手動及自動量測以及觀察系統須開始進行。

2. 量測與觀察

- (1) 依 CNS 12514-1 之規定，監控試體遮焰性及阻熱性，並進行相關的量測及觀察。
- (2) 除移動式熱電偶以外，所有固定之熱電偶在試驗期間應每隔不超過 1 分鐘即量測一次。移動式熱電偶之量測，如溫度在 20 秒量測時間內未達 150°C ，則須持續量測。
- (3) 爐內壓力之量測及記錄應在監控點連續或每隔不超過 5 分鐘間隔進行一次。
- (4) 一般性觀察有關試體構材之變形、裂開、融化、軟化、剝落、炭化等現象均須記錄，另從非加熱面逸出之煙狀亦須記錄。



圖 4-1 樓板與牆非曝火面熱電偶及內部溫度(T1~T5、T-1-1~T-1-7)位置圖
(資料來源：本研究整理)

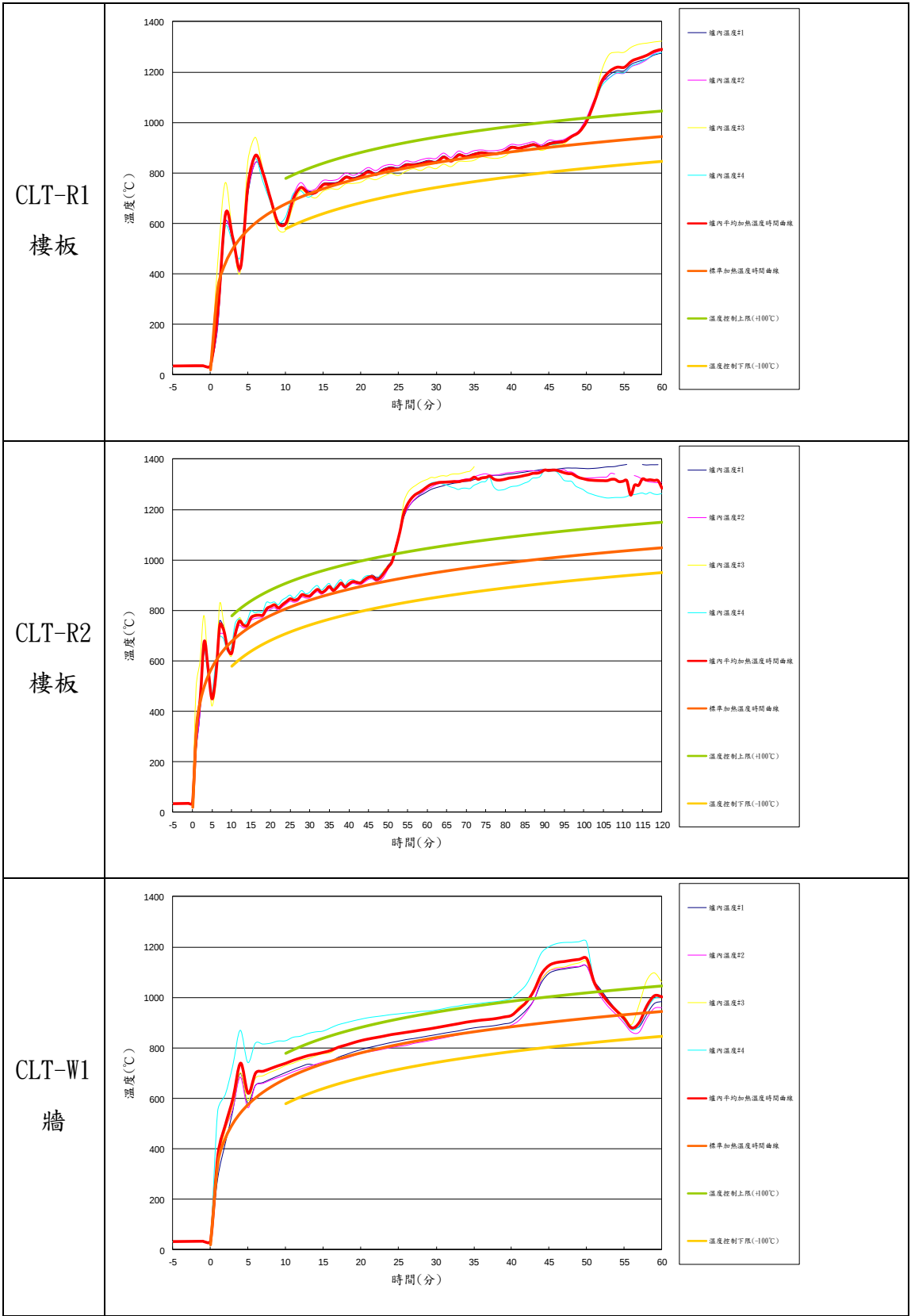
二、實驗結果整理

CLT 樓板及牆加熱實驗後，經清除炭化層後所殘留之結構斷面，以每 10cm 距離量測其縱向及橫向炭化深度值，其炭化深度與炭化速率實驗結果如表 4-1 所示，試體爐內溫度與非加熱面溫度及試體內部溫度曲線圖如圖 4-2 及圖 4-3 所示。

表 4-1 CLT 樓板及牆炭化深度與炭化速率實驗結果表

試體編號	CLT 板材	層數	每層厚度(cm)	加熱時間(min)	炭化深度(mm)	炭化速率(mm/min)	備註
CLT-R1	樓板	5	3	60	64.0	1.07	
CLT-R2	樓板	5	3	120	—	—	樓板加熱後僅剩一層板材，且有破洞脫落無法量測。
CLT-W1	牆	5	2.4	60	62.7	1.05	
CLT-W2	牆	5	2.4	90	97.1	1.62	加熱至 90 min 時試體非加熱面起火，終止加熱。

(資料來源：本研究整理)



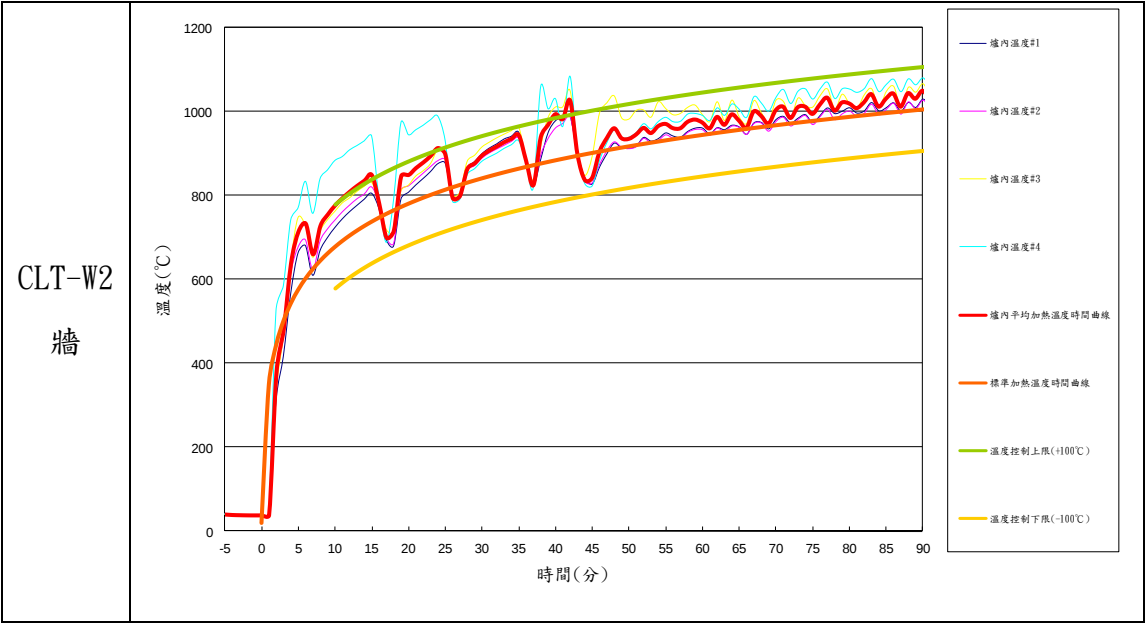
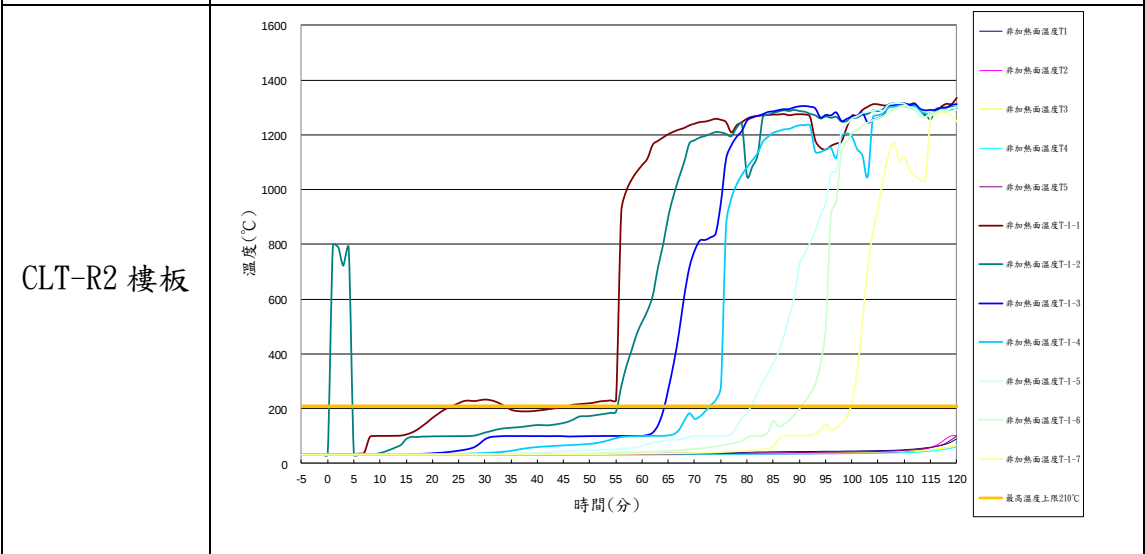
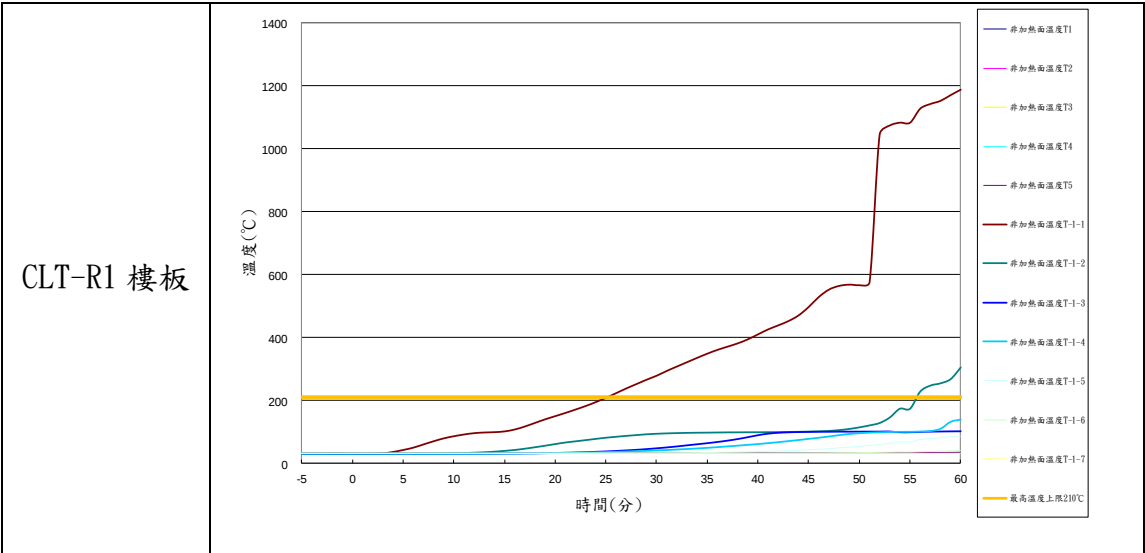


圖 4-2 試體內部溫度時間曲線圖
(資料來源：本研究繪製)



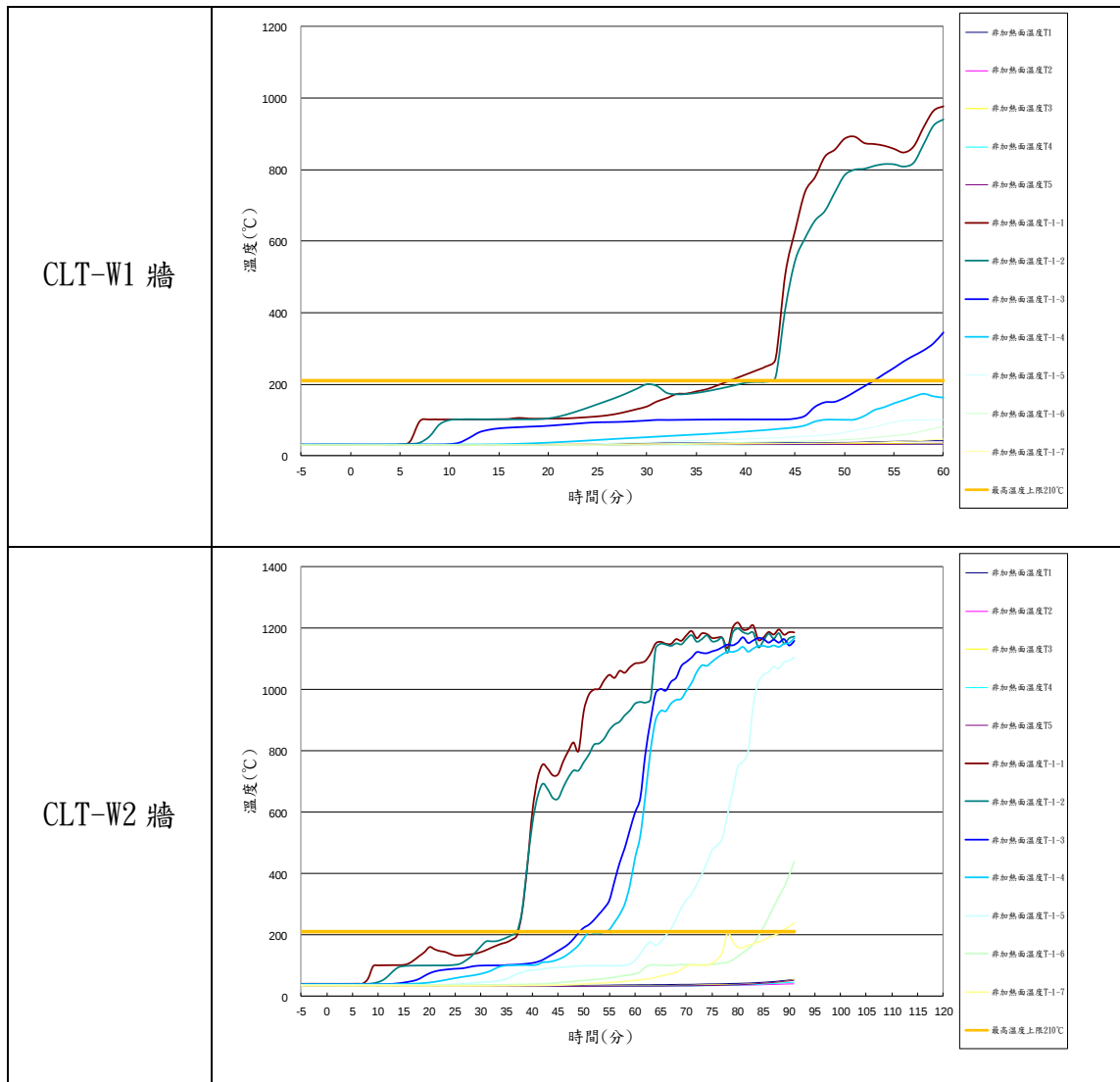


圖 4-3 非加熱面溫度及橫截面溫度時間曲線圖

(資料來源：本研究繪製)

1. CLT 板材加熱結果探討

CLT 樓板經加熱實驗後由爐內溫度顯示加熱 1 分鐘後 CLT 板材隨即起火劇烈燃燒，經過 5~10 分鐘後第一層板材產生炭化層，燃燒現象趨緩，實驗經過約 48 分鐘時第二層開始起火燃燒，52~55 分鐘時第一層炭化層脫落，此時加熱爐內已經累積 CLT 板材大量的可燃物火載量，因劇烈燃燒導致 CLT-R1 及 CLT-R2 於 55 分鐘後爐內溫度快速上升至高達 1300°C 左右，已超過 CNS 12514-1 標準加熱曲線溫度值，此時亦加速炭化深度及炭化速率，而試體 CLT-R2 經加熱 2 小時後原有 5 層板材亦僅剩一層板材。

由非加熱面溫度量測點 T1~T5 顯示 CLT 板材具有良好的阻熱性能，溫度維持在 35~103°C 左右，試體 CLT-R1 的內部溫度 T-1-1 顯示 52 分鐘時因第一層炭化

層脫落，測溫線直接曝火導致溫度急速上升 1000℃ 以上，試體 CLT-R2 的內部溫度 T-1-1 顯示 55 分鐘時因第一層炭化層脫落，試體內部溫度測溫線直接曝火導致溫度急速上升至 1000℃ 以上，內部溫度測溫線 T-1-2 亦於 68 分鐘後溫度上升。

CLT 牆經加熱實驗後由爐內溫度顯示加熱 1 分鐘後 CLT 板材隨即起火劇烈燃燒，經過 4~8 分鐘後第一層板材產生炭化層，燃燒現象趨緩，實驗經過約 40 分鐘時第二層開始起火燃燒，37~43 分鐘時第一層炭化層脫落，此時加熱爐內已經累積 CLT 板材大量的可燃物火載量，因劇烈燃燒導致 CLT-W1 於 45 分鐘後爐內溫度快速上升至高達 1100℃ 左右，已超過 CNS 12514-1 標準加熱曲線溫度值，此時亦加速炭化深度及炭化速率，而試體 CLT-W2 因板材的不確定性因素導致爐內溫度忽高忽低，但均在標準加熱曲線上、下限範圍內，經加熱 1 小時 30 分後因非加熱面起火燃燒影響試驗設備及人員安全，立即終止加熱。

由非加熱面溫度量測點 T1~T5 顯示 CLT 板材具有良好的阻熱性能，溫度維持在 33~56℃ 左右，試體 CLT-R1 的內部溫度 T-1-1 顯示 43 分鐘時因第一層炭化層脫落，測溫線直接曝火導致溫度急速上升 900℃ 以上，試體 CLT-R2 的內部溫度 T-1-1 顯示 37 分鐘時因第一層炭化層脫落，試體內部溫度測溫線直接曝火導致溫度急速上升至 1000℃ 以上，內部溫度測溫線 T-1-2 亦於 37 分鐘後溫度上升。

2. 實驗結果原因探討

本研究實驗試體 CLT-R1 及 CLT-R2 尺寸 160×140cm，因採水平加熱方式溫度蓄積於試體加熱面底部，且 CLT 板材可燃物火載量大，因小型多功能爐排氣口位於底部排氣功能略顯不足，使得試體於 55 分鐘後加熱溫度均高於標準加熱溫度，炭化深度與炭化速率快速增加，試體 CLT-R2 於 55 分鐘後以高於標準溫度持續加熱，導致樓板加熱 2 小時後僅剩一層板材，且有破洞脫落對炭化深度及炭化速率無法量測；實驗試體 CLT-W1 及 CLT-W2 尺寸 110×60cm，亦因加熱爐排氣功能原因，使得試體 CLT-W2 於加熱 90 分鐘後因加熱面起火燃燒終止加熱，由實驗結果原因分析試體尺寸應縮減，樓板試體縮減為 160×30cm，牆試體縮減為 110×30cm，對於加熱 1 小時可滿足標準溫度加熱條件，但對於加熱 2 小時則須進一步實驗探討。

試體 CLT-R1 加熱 1 小時後炭化深度為 64mm，炭化速率為 1.07mm/min；試體 CLT-W1 加熱 1 小時後炭化深度為 62.7mm，炭化速率為 1.05mm/min；試體 CLT-W2

加熱 1 小時 30 分後炭化深度為 97.1mm，炭化速率為 1.62mm/min，本研究經實驗驗證其炭化深度與炭化速率理論值與實際實驗結果明顯有落差。



圖 4-4 試體 CLT-R1 樓板實驗過程照片
(資料來源：本研究整理)

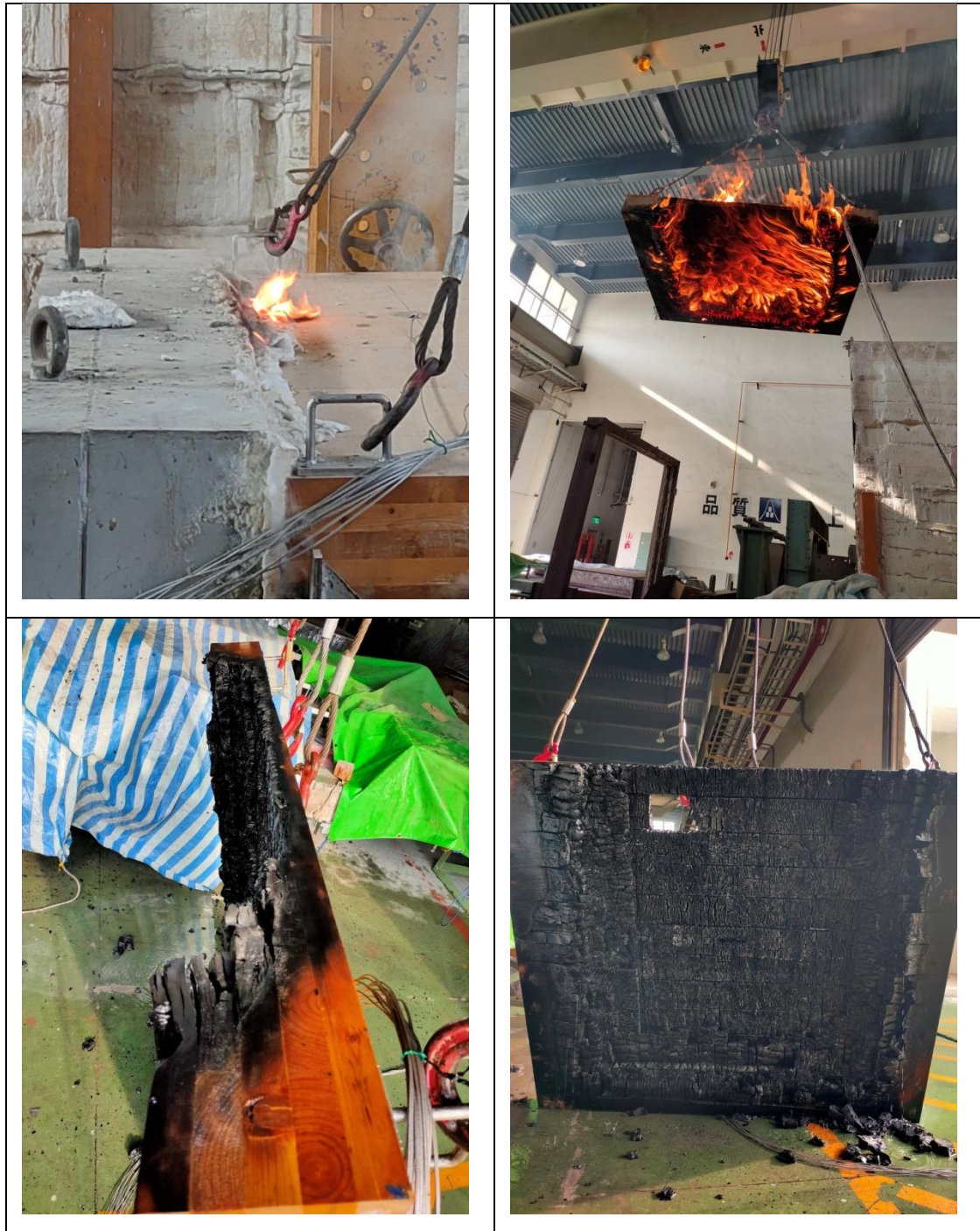


圖 4-5 試體 CLT-R2 樓板實驗過程照片
(資料來源：本研究整理)

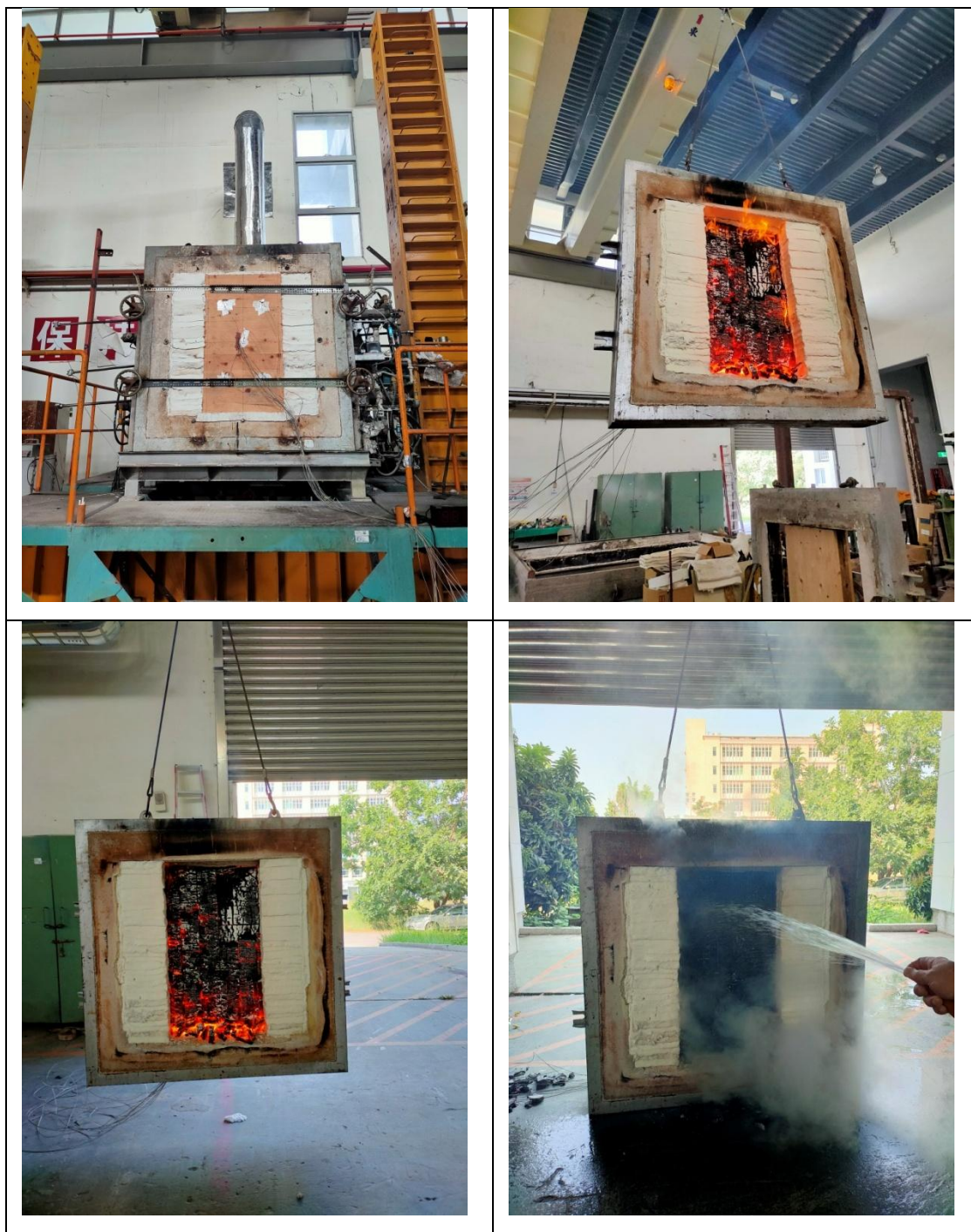


圖 4-6 試體 CLT-W1 樓板實驗過程照片
(資料來源：本研究整理)



圖 4-7 試體 CLT-W2 樓板實驗過程照片
(資料來源：本研究整理)

第二節 炭化深度與炭化率分析

本研究採用 CNS 12514-1 標準加熱溫度曲線，實驗加熱溫度曲線大致符合標準加熱溫度曲線，實驗加熱 1 分鐘以及第 45 分鐘、第 55 分鐘後，實驗加熱溫度曲線高於溫度控制上限值，因試體 CLT-R2 加熱後僅剩一層板材，且有破洞脫落對炭化深度及炭化速率無法量測，僅針對試體 CLT-R1、CLT-W1 及 CLT-W2 進行炭化深度與炭化速率分析。

依日本木材炭化率預估模式，當木材受到加熱燃燒時，日本學者濱田稔之實驗研究之木材炭化速度預估模式公式如(2-8)。

$$\text{檜木：} x = 0.6 \left(\frac{Q}{100} - 2.5 \right) \sqrt{t} \dots\dots\dots (2-8)$$

將本研究實驗結果最高加熱溫度及加熱時間代入公式中，得到以下炭化速度預估值：

試體 CLT-R1：

炭化深度預估值為 $0.6 \left((1290.9/100) - 2.5 \right) \times 7.75 = 48.4\text{mm}$ ，

炭化速率預估值為 $48.4/60 = 0.81\text{mm/min}$

試體 CLT-W1：

炭化深度預估值為 $0.6 \left((1060.3/100) - 2.5 \right) \times 7.75 = 37.7\text{mm}$ ，

炭化速率預估值為 $37.7/60 = 0.63\text{mm/min}$

試體 CLT-W2：

炭化深度預估值為 $0.6 \left((1050.8/100) - 2.5 \right) \times 9.5 = 45.6\text{mm}$ ，

炭化速率預估值為 $45.6/60 = 0.76\text{mm/min}$

由上述計算結果可知加熱爐內溫度越高其炭化深度越大，相對炭化速率亦會加速。日本 CLT 設計手冊對炭化速率規定值為 $0.6 \sim 0.7\text{mm/min}$ 及 $0.84 \sim 1\text{mm/min}$ 兩種，而 1 小時之炭化深度約為 $42\text{mm} \sim 60\text{mm}$ 左右，加熱實驗結果計算後之預估值符合日本 CLT 設計手冊規定。

本研究實驗試體 CLT-R1、CLT-W1 及 CLT-W2 加熱實驗後加熱面經清除炭化層後所殘留之結構斷面如圖 4-10，以每 10cm 距離量測其縱向及橫向炭化深度值，將量測之炭化深度及炭化速率結果整理如表 4-2 及表 4-3。

表 4-2 CLT-R1 樓板炭化深度量測結果

量測點	CLT-R1樓板		量測點	CLT-R1樓板	
	炭化深度(mm)	炭化速率(mm/min)		炭化深度(mm)	炭化速率(mm/min)
1	60	1.00	62	66	1.10
2	59	0.98	63	62	1.03
3	58	0.97	64	65	1.08
4	63	1.05	65	61	1.02
5	67	1.12	66	63	1.05
6	68	1.13	67	64	1.07
7	72	1.20	68	61	1.02
8	70	1.17	69	67	1.12
9	69	1.15	70	62	1.03
10	68	1.13	71	63	1.05
11	68	1.13	72	62	1.03
12	69	1.15	73	63	1.05
13	67	1.12	74	63	1.05
14	64	1.07	75	66	1.10
15	62	1.03	76	63	1.05
16	64	1.07	77	63	1.05
17	68	1.13	78	71	1.18
18	72	1.20	79	69	1.15
19	73	1.22	80	68	1.13
20	69	1.15	81	63	1.05
21	64	1.07	82	63	1.05
22	64	1.07	83	66	1.10
23	68	1.13	84	63	1.05
24	61	1.02	85	69	1.15
25	63	1.05	86	67	1.12
26	58	0.97	87	66	1.10
27	62	1.03	88	65	1.08
28	63	1.05	89	70	1.17
29	66	1.10	90	69	1.15
30	66	1.10	91	65	1.08
31	66	1.10	92	63	1.05
32	67	1.12	93	65	1.08
33	64	1.07	94	63	1.05
34	62	1.03	95	63	1.05
35	65	1.08	96	58	0.97
36	62	1.03	97	62	1.03
37	61	1.02	98	61	1.02
38	64	1.07	99	62	1.03
39	67	1.12	100	69	1.15
40	63	1.05	101	67	1.12
41	64	1.07	102	65	1.08
42	63	1.05	103	59	0.98
43	62	1.03	104	64	1.07
44	63	1.05	105	61	1.02
45	67	1.12	106	62	1.03
46	63	1.05	107	61	1.02
47	61	1.02	108	62	1.03
48	58	0.97	109	63	1.05
49	60	1.00	110	61	1.02
50	64	1.07	111	64	1.07
51	64	1.07	112	64	1.07
52	65	1.08	113	65	1.08
53	69	1.15	114	59	0.98
54	62	1.03	115	65	1.08
55	61	1.02	116	64	1.07
56	67	1.12	117	61	1.02
57	68	1.13	118	62	1.03
58	66	1.10	119	58	0.97
59	60	1.00	120	56	0.93
60	60	1.00	121	56	0.93
61	63	1.05			

(資料來源：本研究整理)

表 4-3 CLT-W1 及 CLT-W2 牆炭化深度量測結果

量測點	CLT-W1牆		量測點	CLT-W2牆	
	炭化深度(mm)	炭化速率(mm/min)		炭化深度(mm)	炭化速率(mm/min)
1	61	1.02	1	78	1.30
2	60	1.00	2	90	1.50
3	59	0.98	3	97	1.62
4	57	0.95	4	92	1.53
5	58	0.97	5	99	1.65
6	66	1.10	6	85	1.42
7	65	1.08	7	74	1.23
8	63	1.05	8	108	1.80
9	67	1.12	9	103	1.72
10	67	1.12	10	102	1.70
11	67	1.12	11	84	1.40
12	63	1.05	12	106	1.77
13	62	1.03	13	116	1.93
14	64	1.07	14	105	1.75
15	68	1.13	15	107	1.78
16	60	1.00	16	88	1.47
17	59	0.98	17	107	1.78
18	58	0.97	18	113	1.88
19	60	1.00	19	106	1.77
20	61	1.02	20	103	1.72
21	64	1.07	21	87	1.45
22	57	0.95	22	106	1.77
23	57	0.95	23	106	1.77
24	62	1.03	24	101	1.68
25	60	1.00	25	100	1.67
26	68	1.13	26	81	1.35
27	62	1.03	27	100	1.67
28	58	0.97	28	102	1.70
29	60	1.00	29	104	1.73
30	63	1.05	30	98	1.63
31	71	1.18	31	83	1.38
32	65	1.08	32	97	1.62
33	62	1.03	33	101	1.68
34	67	1.12	34	104	1.73
35	61	1.02	35	99	1.65
36	75	1.25	36	79	1.32
37	65	1.08	37	96	1.60
38	63	1.05	38	103	1.72
39	64	1.07	39	105	1.75
40	62	1.03	40	106	1.77
41	71	1.18	41	91	1.52
42	62	1.03	42	105	1.75
43	61	1.02	43	102	1.70
44	62	1.03	44	108	1.80
45	60	1.00	45	108	1.80
46	69	1.15	46	83	1.38
47	62	1.03	47	83	1.38
48	57	0.95	48	86	1.43
49	61	1.02	49	87	1.45
50	60	1.00	50	82	1.37

(資料來源：本研究整理)

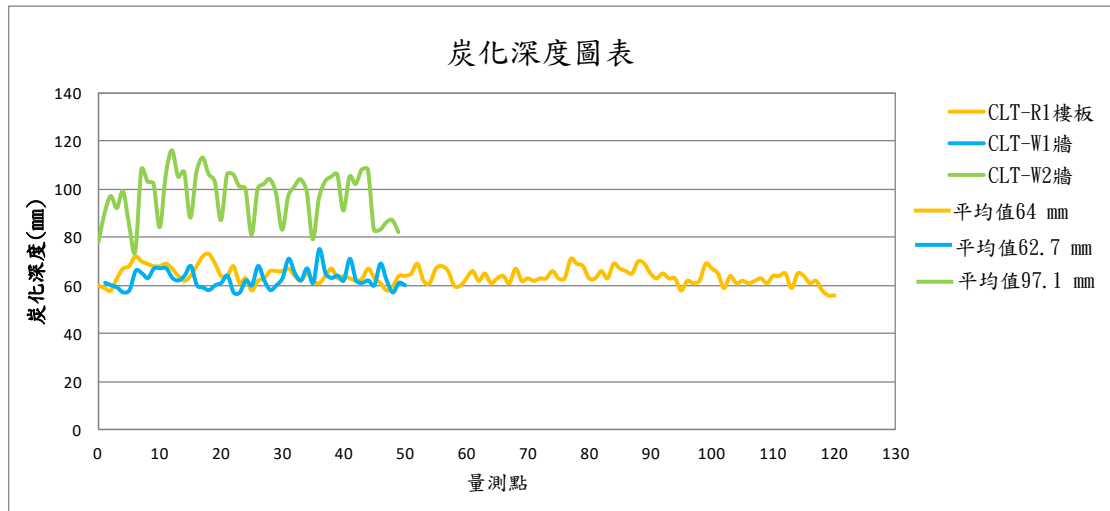


圖 4-8 炭化深度量測結果
(資料來源：本研究繪製)

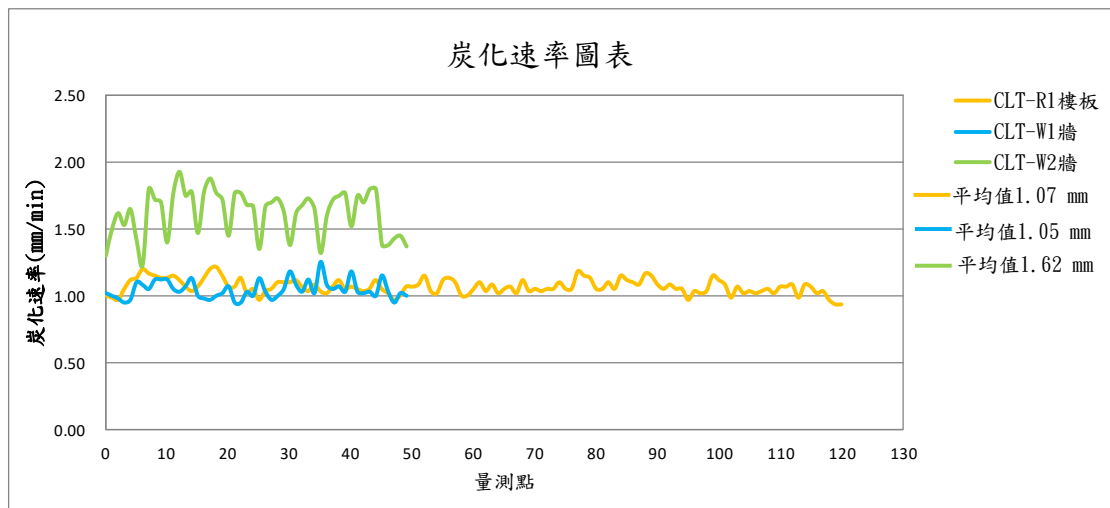


圖 4-9 炭化速率計算結果
(資料來源：本研究繪製)

由圖 4-8 及圖 4-9 炭化深度量測結果 CLT-R1 樓板平均炭化深度值為 64mm，平均炭化速率為 1.07mm/min；CLT-W1 牆平均炭化深度值為 62.7mm，平均炭化速率為 1.05mm/min；CLT-W2 牆平均炭化深度值為 97.1mm，平均炭化速率為 1.62mm/min。

CLT-R1 樓板及 CLT-W1 牆經 1 小時加熱試驗其炭化量測結果趨近，但均略高於文獻值 1 mm/min，研判係因實驗加熱過程初期 1 分鐘及第 55 分鐘後爐內溫度高於標準加熱溫度，導致炭化深度及炭化速率加快。

本研究炭化深度與炭化速率有應用範圍及條件限制，因 CLT 板材各層間以不同方向垂直交錯膠合而成，實驗試體樓板係為四邊支承方式進行加熱試驗，實驗

過程中因有重力因素第 1 層板材產生脫落後，第 2 層板材亦有支承作用，若為單邊或兩邊支承的樓板經燃燒後第 1 層板材產生脫落，第 2 層板材因與第 1 層板材不同方向並無支承作用，樓板結構乘載力馬上由第 3 層或以上之板材支承，因此，本研究炭化深度與炭化速率僅應用於四邊支承的樓板。實驗試體牆則採兩邊自由端方式進行試驗，因此，炭化深度與炭化速率應用範圍較為廣泛。

CLT-R1 (加熱 1 小時)	
CLT-W1 (加熱 1 小時)	
CLT-W2 (加熱 1 小時 30 分)	

圖 4-10 試體刮除炭化層後相片
(資料來源：本研究整理)

第五章 結論與建議

第一節 結論

- 一、實驗試體 CLT-R1 及 CLT-R2 尺寸 160×140cm，因採水平加熱方式溫度蓄積於試體加熱面底部，且 CLT 板材可燃物火載量大，因小型多功能爐排氣口位於底部排氣功能略顯不足，使得試體於 55 分鐘後加熱溫度均高於標準加熱溫度，實驗試體 CLT-W1 及 CLT-W2 尺寸 110×60cm 試驗結果亦相同，建議試體尺寸應縮減，樓板試體縮減為 160×30cm，牆試體縮減為 110×30cm，對於加熱 1 小時可滿足標準溫度加熱條件，但對於加熱 2 小時則須進一步實驗探討。
- 二、炭化深度量測結果 CLT-R1 樓板平均炭化深度值為 64mm，平均炭化速率為 1.07mm/min；CLT-W1 牆平均炭化深度值為 62.7mm，平均炭化速率為 1.05mm/min；CLT-W2 牆平均炭化深度值為 97.1mm，平均炭化速率為 1.62mm/min，試體 CLT-R1 樓板及 CLT-W1 牆經 1 小時加熱試驗其炭化量測結果趨近，但均略高於文獻值 1 mm/min，研判係因實驗加熱過程初期 1 分鐘及第 55 分鐘後爐內溫度高於標準加熱溫度，導致炭化深度及炭化速率加快。
- 三、實驗結果炭化深度及炭化速率與日本炭化預估模式交叉比對雖可符合文獻設計手冊規定，但實際加熱實驗結果卻略高於理論值，研究顯示爐內加熱溫度應以可控制在標準加熱溫度曲線，避免受高溫影響其炭化深度及炭化速率。
- 四、建議扁柏樹種直交集成板之炭化深度與炭化速率防火設計值，1 小時炭化深度防火設計值為 64mm，炭化速率防火設計值為 1 mm/min，2 小時部分因加熱爐內溫度偏高則須進一步實驗探討。

第二節 建議

建議一

可以依據 CLT 木構造炭化深度及炭化速率實驗結果研提木構造建築物設計及施工技術規範修正建議：立即可行建議

主辦機關：本部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

現行「木構造建築物設計及施工技術規範」第九章建築物之防火中第 9.3 節木構造防火設計定義木構造分為梁柱構件、框組壁式、原木層疊三類，建議增訂直交集成板 CLT 炭化深度與炭化速率。此項研究成果可供構造建築物設計及施工技術規範修正建議。

建議二

研擬直交集成板材不同樹種的炭化深度與炭化速率防火設計規範：中長期建議

主辦機關：本部建築研究所

協辦機關：內政部營建署

本研究受限經費僅能進行日本扁柏之樓板及牆試驗，未能涵蓋國產柳杉、日本柳杉、北美 SPF、花旗松及歐洲雲杉等國際間常用材種，若未來能納入研究，則可涵蓋國際間常用樹種之炭化深度與炭化速率防火設計規範參考。

附錄一 期初、期中及期末會議紀錄回覆

(一) 期初審查會議記錄與回應

項次	審查意見	研究回應
1	針對梁柱構件角隅處炭化率計算方式與兩側邊不同要如何計算，建議可納入今年研究案評估計算方式。	因 CLT 為牆板系統無梁柱構件，本年度研究案以樓板及牆為主。
2	木構造膠合材料不同，炭化率及炭化深度也會有所不同，請了解木構造膠合原理與防火時效說明比對。	膠合劑的類型和木材厚度對 CLT 炭化速率的影響，如果能夠掌握結構材的炭化速率的話，則可以基於初始截面來計算剩餘截面的耐火性。
3	請說明實驗材料選用以日本 CLT 為主。CLT 是否為耐燃材料及燃燒產生的發煙量多寡。	配合本所協同研究案選用相同的日本 CLT 實驗試體，國外研究表明 CLT 為良好的耐燃材料，而燃燒產生的發煙量需進一步研究。
4	膠合集成材與 CLT 膠合方式是否相同應敘明清楚，實驗以小型多功能爐進行測試是否考慮使用大型梁柱複合爐進行測試。	集成材以同方向膠合而成，CLT 則是以縱橫向膠合而成，兩者不同於層板組合，今年度協同研究案以大型梁柱複合爐進行測試，本研究則以小型多功能爐進行測試。
5	木構造建築物設計及施工技術規範規定樓層高度不可超過 4 層樓，臺中森科總部標註	遵示辦理。

	為 5 層樓請釐清確認。	
6	本研究之方向具體可行，研究內容應予論述釐清界定。	遵示辦理。

(二)期中審查會議記錄與回應

項次	審查意見	研究回應
1	材料選擇檜木及膠之原因可再說明。	目前國內僅一家廠商代理日本 CLT、一家廠商代理奧地利 CLT、一家廠商國產 CLT(該廠商還未申請防火時效測試及工程實績)，本研究案因經費有限，由代理日本 CLT 廠商無償提供實驗試體進行研究，未來國內廠商若也願意提供免費試體，將可規劃納入實驗研究。
2	TCL 及一般木材(原木或合成木)之炭化差異主要在膠及接合面，未來結果可朝此方向討論。	今年度以日本 CLT 為研究對象，後續可針對不同國家生產之 CLT 及材種探討不同膠合劑對炭化層的影響。
3	文內已收集相關學者提出炭化率評估公式，目前僅進行樓板與牆各 2 組試驗，建議將其相關參數深入分析並繪製比較圖形，再定出實驗參數，後續炭化率評估模式研析較容易聚焦。	樓板與牆加熱實驗後炭化深度與炭化率結果將與炭化率評估模式比較分析，利用實驗數據與預估模式之相關係數討論公式預估之準確性，並提出國內炭化深度設計值。

4	「圖 3-1 CNS 12514-1、ISO 834-1、ASTM E119 加熱溫度曲線」應不包含 ASTM E119 加熱溫度曲線，請修正。	已修正。
5	參考書目格式請再確認。另部分學者文內有提及，但是參考書目未列入。	已修正。
6	本案是否有評估板片方向性與燃燒及載重的關係(例如單向板)。	CLT 板為縱橫多層次積材屬縱橫交叉方向非單向板，今年主要以均勻加熱無載重測試方式探討炭化深度及速率。
7	直交集成板 CLT 所使用的膠合劑用量、成分、厚度等，是否會影響縱橫向炭化深度及速率。	本研究採用日本 CLT 實驗試體，其規格符合日本 JAS “直交集成板的日本農林規格”規定。
8	集成板可能涉及木材本身、膠結物，對防火特性會有影響。	遵示辦理。
9	集成材或許不適合用於結構承重材？建議可以往防火門牆方向研究。	國外研究表明 CLT 板材為承重能力極佳之結構承重材，目前最高為 24 層樓純 CLT 板材組立而成。
10	研究題目是直交集成板但研究報告第二章寫縱橫多層次實木結構積材，是否相同請確認修正。	CLT 又稱為縱橫多層次實木結構積材或直交集成板，國內 CNS 已定義為直交集成板，本研究報告將統一修正為直交集成板。

11	實驗試體選用日本扁柏之原因為何？應選用臺灣樹種例如臺灣松、柳杉、杉木等材料，另有關膠合劑選用水性高分子異氰酸脂，目前國內無此類膠，選用水性高分子異氰酸脂原因為何？	因實驗試體採用日本進口之扁柏試體，其水性高分子異氰酸脂膠合劑用量、成分、厚度等亦符合日本 JAS “直交集成板的日本農林規格”規定。
12	簡報第 16 頁以雷射測距儀如何量測炭化深度？其準確度是否正確。	本研究炭化深度量測方式係以本所防火實驗中心發明之專利“樓板厚度量測方法”之量測設備進行，使用之雷射測距儀精度為 0.1mm。
13	臺灣大多以 RC 或鋼構為主甚少木造構部分，但木構造建築具氣密、隔音、保溫、環保、耐震等優點，木構造的耐火性與防火性要符合技術規範不容易，未來方向應推廣。	感謝委員意見。
14	本所今年另一項CLT 協辦案有加載測試，請就兩項研究結果比較分析有、無加载炭化深度的差異，及探討未來應用的合理性。	協辦案 CLT 實驗試體作加熱加载測試 1 小時，但僅加载 300 kg/m^2 ，依建築技術規則樓板載重應為 $200\sim600 \text{ kg/m}^2$ ，且試體產生撓曲後其炭化深度與速率各部分均有所差異，如載重不同炭化深度與速率亦不同，本研究針對 CLT 實驗試體採均勻受熱

		方式，其炭化深度與炭化率有較高準確率。
15	從研究方法角度來看，如僅選用國外CLT 材種比較偏向產品驗證就性質，如能選用臺灣建材較具有本土研發的價值。	目前國內生產之 CLT 板材尚未有經過防火時效試驗認證，亦無新材料新工法審核認可，後續可針對國內 CLT 板材進行相關試驗研究。

(三)期末審查會議記錄與回應

1	研究內容探討CLT板材的炭化特性，目前實驗成果顯示炭化深度與炭化速率等與文獻資料相符，研究成果符合預期目標。	感謝委員意見。
2	未來宜持續進行參數分析，包括層數的變化、不同木材、以及加長加熱關聯(探討防火時效的延伸)。	未來將持續進行國產柳杉、日本柳杉、北美 SPF、花旗松及歐洲雲杉等國際間常用材種、層數的變化等炭化數據資料，並調整實驗試體尺寸，以達到 2 小時防火時效的驗證研究。
3	有關實驗結果與文獻預測炭化率比較分析部分，建議可再	遵示辦理。

	增加其他國外學者於標準升溫曲線進行之炭化深度的評估模式(例如 White and Nordheim, 1992、Yang, etal., 2009、White and Dietenberger, 1999等)。	
4	因防火實驗經費高，本土化數據收集極不容易。本案實驗資料建議與本所109年協同研究計畫「直交集成板(CLT)構造防火設計之研究」研究成果整併提案增修「木構造建築物設計及施工技術規範」。	遵示辦理。
5	CLT加熱試驗時隨著加熱過程會產生炭化層脫落之情況，如此會有炭化速率非線性的狀態，未來增修法規時應將此考量於炭化率的規定中。	CLT 樓板及牆加熱試驗時因有重力因素，炭化層會隨著加熱過程產生脫落，考量炭化速率非線性應作係數折減，如何折減則需進一步研究探討。
6	建議累積這些研究成果，參加	感謝委員意見。

	國內外研討會，本研究項目的立意及研究成果頗值得分享。	
7	日後研究課題可以進一步深入討論CLT所使用的膠合劑用量、成分、厚度等影響。	遵示辦理。
8	研究的數據資料庫是否足夠建立炭化速率、深度的評估模式？或是只足夠作一初步了解。	今年研究僅針對日本扁柏樹種進行研究，將持續建立不同樹種的炭化深度與炭化速率數據資料庫。
9	本實驗在建立對CLT板材的本國實驗成果及測試，以了解實際性能，值得肯定。	感謝委員意見。
10	實驗結果與國外文獻有差異，是否因為儀器實驗條件不同而導致，可以進一步探討。	因木材可燃物火載量大導致實驗結果與國外文獻有差異，將調整實驗試體尺寸，使小型多功能加熱爐加熱條件可符合標準升溫曲線。
11	由於CLT板材各層間以不同方向垂直交錯，以長向樓板為例，若曝火面板材與長向平	將於成果報告敘述本研究炭化深度與炭化速率應用範圍及條件。

	行，當第1層燒毀脫落，第2層拼接材因與長向垂直，無法發揮結構作用，乘載力馬上由第3層以上之板材承擔，因此其火害後之乘載力不宜比照一般實木木材以炭化深度直接表述。若要以炭化深度表述，則應有詳細說明，以免誤用。	
--	--	--

參考書目

1. 內政部營建署，「木構造建築物設計及施工技術規範」，2011。
2. 內政部營建署，「建築技術規則」，2019。
3. 木質構造設計規準・同解說，日本建築學會，2006。
4. 何明錦，雷明遠，「木構造防火技術規範與集成材炭化特性之研究」，2005。
5. 中村賢一、山田誠，「木造建築の防火設計」，1998。
6. 陳啟仁總編輯，「木構造建築物防火設計施工參考手冊」，內政部建築研究所，台北，2014。
7. 楊德新、王松永，「中小徑木製造構造用集成材及其工程性能之研究」，國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系博士論文，2007。
8. 蘇鴻奇，「框組壁式木構造牆耐火性能研究」，國立成功大學博士論文，2014。
9. 濱田稔，「木材の燃焼速度」，日本火災学会論文集，Vol. 2，No. 3: 11-12，1953。
10. 菅原進一，「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，日本建築學會，北海道，日本，1978。
11. 安井昇，大規模木造建築の防耐火設計，技術報告，Vol. 40，No. 4，pp7-18，2015。
12. 安井昇，加来千紘，スギ材を仕上げに用いた準耐火構造壁の開発，技術報告，Vol. 41，No. 4，pp9-20，2016。
13. CLT 関連告示等解説書，日本住宅・木材技術センター，2016。
14. CLT 用建築物設計與施工規範，日本住宅・木材技術センター，2016。
15. 中華民國國家標準 CNS 12514-1 (2014)，「建築物構造構件耐火試驗法-第1部：一般要求事項」，經濟部標準檢驗局。
16. 中華民國國家標準 CNS 12514-5 (2014)，「建築物構造構件耐火試驗法-第5部：承重水平區劃構件」，經濟部標準檢驗局。
17. 中華民國國家標準 CNS 12514-8 (2014)，「建築物構造構件耐火試驗法-第8部：非承重垂直區劃構件」，經濟部標準檢驗局。
18. GBT 50708 膠合木結構技術規範，大陸，2012。
19. International Building Code(IBC)，美國，2015。
20. National Design Specification for Wood Construction (NDS)，美國，2015。
J. S. Afr. Inst. Civ. Eng., Fire tests of South African cross-laminated

timber wall panels: fire ratings, charring rates, and delamination,
vol. 62 n. 1 Midrand Mar. 2020.

21. Kathinka Leikanger Friquin, Mads Grimsbu, Per Jostein Hovde., Charring rates for Cross-laminated timber panels exposed to standard and parametric fires, 2010.
22. Michael Klippel, Claude Leyder, Andrea Frangi, Mario Fontana., Fire Tests on Loaded Cross-laminated Timber Wall and Floor Elements, 2014.