

直交集成板(CLT)構造防火設計之研究

內政部建築研究所協同研究報告(109年12月)

直交集成板(CLT)構造 防火設計之研究

內政部建築研究所協同研究報告

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 防火設計之研究

研究主持人：王榮進
協同主持人：蔡孟廷
研究員：楊德新、雷明遠
 李其忠、詹家旺
研究助理：趙偉成、汪姮慈

內政部建築研究所協同研究報告

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.....	XI
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景.....	1
第二節 研究目的與重要性.....	1
第三節 研究方法與步驟.....	2
第二章 文獻回顧.....	5
第三章 研究方法及實驗規劃.....	11
第一節 研究方法.....	11
第二節 火害實驗設備及規畫.....	15
第三節 實驗試體組裝.....	18
第四章 實驗結果及討論.....	37
第一節 日本扁柏 CLT 樓板.....	37
第二節 北美花旗松 CLT 樓板.....	53
第三節 國產柳杉 CLT 牆板.....	66
第四節 火害之撓曲變形理論值與實驗值比較.....	73
第五節 不同材種及集成元厚度 CLT 樓板之撓曲變形.....	75
第五章 規範修正建議.....	77
第一節 實驗結果討論.....	77
第二節 規範修訂建議.....	80
第六章 結論與建議.....	87

第一節 結論.....	87
第二節 建議.....	88
參考文獻.....	89
附錄一 期初、期中及期末審查會議記錄.....	91
附錄二 專家座談會紀錄.....	103

表次

表 1-1 研究進度及預期完成之工作項目	4
表 2-1 不同膠合層數下之炭化深度建議.....	5
表 2-2 不同樹種穩態燃燒之臨界質量損失速率及臨界外部熱通量	7
表 2-3 加拿大鐵杉燃燒試材之防火性能試驗表	8
表 3-1 EU5 針對實木及集成材之密度所訂定之炭化深度速率	12
表 3-2 北美 CLT HANDBOOK(參考 NDS 之數據)所建議之炭化深度速率.....	12
表 4-1 日本扁柏 CLT 炭化深度量測結果	46
表 4-2 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒前 EI_{eff} 計算表	48
表 4-3 日本扁柏 CLT 樓板試體第 1 層完全碳化 EI_{eff} 計算表	50
表 4-4 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘 EI_{eff} 計算表.....	52
表 4-5 北美花旗松 CLT 炭化深度量.....	60
表 4-6 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒前 EI_{eff} 計算表	62
表 4-7 美國花旗松 CLT 樓板試體第 5 層完全碳化 EI_{eff} 計算表	64
表 4-8 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘 EI_{eff} 計算表.....	66
表 4-9 國產柳杉 CLT 炭化深度量測結	72
表 5-1 規範表 9.3-2 適用 1 小時防火設計之直交集成板 CLT.....	81
表 5-2 木構造建築物設計及施工技術規範部分修正條文案草案對照表.....	83

圖次

圖 1-1 研究流程	3
圖 2-1 非標準加熱試驗及以 EUROCODE 5 預測之炭化深度及炭化率	5
圖 2-2 室溫下軸向及橫向之載重撓曲圖	6
圖 2-3 耐燃試驗測得之炭化深度及炭化率	7
圖 2-4 PRF 於所有試驗溫度下與實木具相似之強度	9
圖 2-5 防火披覆失效後於受保護的木材表面觀察到的炭化現象增加	10
圖 3-1 木材燃燒炭化層	11
圖 3-2 防火實驗加熱曲線 ISO834-1	11
圖 3-3 CLT 火害後之炭化層及殘留斷面[6]	13
圖 3-4 梁、柱複合耐火試驗爐	15
圖 3-5 門牆耐火實驗爐	16
圖 3-6 單片 160X440CM 日本扁柏 CLT 之拼接	18
圖 3-7 防火棉佈置	19
圖 3-8 測溫點與測溫線示意圖	21
圖 3-9 佈設測溫棒	21
圖 3-10 測試測溫孔數據是否無異常	21
圖 3-11 載重塊之配置及位移計之架設位置(單位:CM)	22

圖 3-12 載重塊配置完成	23
圖 3-13 位移計之架設	23
圖 3-14 單片 151.5*432CM 美國花旗松 CLT 之拼接	24
圖 3-15 測溫點規劃及各點位之測溫線埋設深度(單位:CM)	25
圖 3-16 試體放入框架內並在邊框周圍塞入防火棉後架高佈置底部防火棉	26
圖 3-17 載重塊之配置及位移計之架設位置	27
圖 3-18 測溫棒佈置	28
圖 3-19 儀器設置完成	28
圖 3-20 試體吊入爐內	28
圖 3-21 設置載重塊	28
圖 3-22 載重塊布置完成	28
圖 3-23 位移計架設完成	28
圖 3-24 國產柳杉 CLT 拼接方式及單元尺寸	29
圖 3-25 國產柳杉 CLT 牆板立面示意圖及框架尺寸	30
圖 3-26 國產柳杉 CLT 牆板之拼接	31
圖 3-27 測溫點規劃及各點位之測溫線埋設深度(單位:CM)	33
圖 3-28 測表溫度線之電熱偶及位移計之架設位置	34
圖 3-29 試體框架組立	35

圖 3-30 於框架四周佈置防火棉	35
圖 3-31 試體含框架於曝火面立面圖	35
圖 3-32 試體含框架於非曝火面立面圖.....	35
圖 3-33 29 條熱電偶佈線完成.....	36
圖 3-34 設置好 2 處垂直位移後，將黃色鐵架移動到試體前方，並開始設置另外 2 處之水平位移。	36
圖 3-35 水平位移及自由端位移架設完成。	36
圖 3-36 前置作業均完成後，開始加載重。	36
圖 4-1 標準加熱溫度曲線與日本扁柏實驗加溫曲線之比較.....	37
圖 4-2 日本國土交通省公告之 CLT 炭化層設計	38
圖 4-3 炭化深度之預估	38
圖 4-4 測溫點 E 點:不同深度測溫計之升溫曲線	39
圖 4-5 測溫點 F 點:不同深度測溫計之升溫曲線.....	39
圖 4-6 位移計 1 及 2 所量測之撓曲變形.....	40
圖 4-7 實驗試體每 30CM 分割成一個單元	41
圖 4-8 單元斷面以 30CM 為間隔之量測點位	42
圖 4-9 試體分割流程.....	43
圖 4-10 熱解層基線 T 點及碳化層基線 D 點.....	43

圖 4-11 炭化深度量測結果	45
圖 4-12 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒前示意圖	47
圖 4-13 日本扁柏 CLT 樓板試體第 5 層完全碳化示意圖	49
圖 4-14 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘示意圖	51
圖 4-15 標準加熱溫度曲線與北美花旗松實驗加熱曲線之比較	54
圖 4-16 測溫點 E 點:不同深度測溫計之升溫曲線	55
圖 4-17 測溫點 F 點:不同深度測溫計之升溫曲線	55
圖 4-18 位移計 1 及 2 所量測之撓曲變形	56
圖 4-19 實驗試體每 30CM 分割成一個單元	57
圖 4-20 單元斷面以 30CM 為間隔之量測點位	58
圖 4-21 炭化深度量測結果	59
圖 4-22 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒前示意圖	61
圖 4-23 美國花旗松 CLT 樓板試體第 5 層完全碳化示意圖	63
圖 4-24 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘示意圖	65
圖 4-25 標準加熱溫度曲線與北美花旗松實驗加熱曲線之比較	67
圖 4-26 各量測點不同深度測溫計之升溫曲線	68
圖 4-27 實驗各量測點之變形	68
圖 4-28 實驗試體每 30CM 分割成一個單元	69

圖 4-29 單元斷面以 30CM 為間隔之量測點位.....	70
圖 4-30 炭化深度量測結果	71
圖 4-31 日本扁柏 CLT 理論與實驗撓曲變形之歷時比較.....	74
圖 5-1 理論與實驗撓曲變形之歷時比較.....	79

摘要

關鍵字：直交集成板、炭化深度、炭化速率、殘餘強度

一、研究緣起

有鑑於國內目前木構造建築限高 4 層樓，考量防火結構物之主要樓板及承重牆防火時效為 1 小時的情況下，因此本研究針對直交集成板 CLT 在 1 小時的火害下進行其炭化深度及火害行為之研究。主要研究方法透過考察歐洲、北美、日本等地有關直交集成板 CLT 之構造防火法規與規範，來探討國產及進口直交集成板 CLT 之防火性能。此外，透過實驗結果之驗證，研提「木構造建築物設計及施工技術規範」中直交集成板 CLT 構造防火規定之草案，並針對「木構造建築物防火設計施工參考手冊」中，有關直交集成板 CLT 構造專章內容提出增修建議及草案。本研究預計進行 2 組 CLT 樓板及 1 組 CLT 牆板之火害實驗，做為驗證所需。

二、研究方法及過程

本研究預計透過文獻回顧分析及實驗驗證的方式建立國內基礎資料。實驗方面，規劃直交集成板 CLT 之炭化深度實驗及防火性能之確立，透過 1 小時之火害實驗確立不同材種(日本扁柏、北美花旗松)之 CLT 樓板及國產柳杉 CLT 牆板，在加載下之炭化深度。另外，本研究並參考各國相關規定，提出國內 CLT 樓板在火害後之殘餘斷面等值 EI，用以估算 CLT 樓板在 1 小時火害後之變形趨勢。

三、重要發現

研究成果首先針對不同材種 CLT 之炭化深度進行探討。透過預先埋設在不同深度測溫計之溫升曲線中，可發現日本扁柏 CLT 之曝火面第 1 層測溫點大約在 18 分鐘左右有較明顯的升溫趨勢，顯示此時測溫計已經受到火爐溫度之影響，炭化已經達到此深度，因此概算炭化速率約為 0.8mm/min；而北美花旗松 CLT 之曝火面第 1 層測溫線大約在 22 分鐘左右有較明顯的升溫趨勢，概算炭化速率約為 0.68mm/min。另外，根據整體實驗結果，日本扁柏 CLT 樓板及北美花旗松 CLT 樓板之曝火面第 2 層均無明顯升溫現象，顯示火害所造成炭化層並未

完全燒盡曝火面第 2 層。兩組樓板 CLT 之炭化深度經量測觀察，均可發現在 CLT 板搭接處有較大的炭化深度產生。由於搭接處無法如同板本身緊密接合，因此會有火源竄入並造成較深的炭化層。國產柳杉 CLT 牆板由於無樓板般較大之撓曲變形產生，搭接處並沒有無法密合之影響，因此搭接及非搭接部分之炭化深度無明顯差異。國產柳杉 CLT 之平均炭化深度約為 4.1cm~5.1cm 左右，平均炭化速率介 0.68~0.85mm/min。較現行規範建議之底部炭化深度 4.68cm 為大。

另外，本研究亦參考國外規範，進行火害時由於炭化層產生，導致整體強度下降，以致整體撓度會有持續加大的評估方法進行探討。由評估結果可顯示，當曝火面第 1 層完全炭化，底層主軸由曝火面第 1 層集成元的強軸變為曝火面第 2 層集成元的弱軸，因此造成撓度大幅度的增加。此外，當曝火面第 1 層(強軸)完全炭化後，並燃燒至曝火面第 2 層(弱軸)時，實驗數據顯示其撓度會突然增大，與理論所推得的結果相同，原因為弱軸不提供強度導致整體樓板等值 EI 值下降而變形遽增。另外，由於弱軸不提供強度，理論上通過急遽變形階段時，由於強軸層(曝火面第 3 層)受到弱軸層(曝火面第 2 層)保護，因此整體等值 EI 值維持固定的情況下，撓曲變形應為一固定值。然而，CLT 板同層各集成元間並沒有進行膠合，故在燃燒時，集成元間會因為受載重的影響產生縫隙，使得火焰經由縫隙對上層集成元進行燃燒，導致整體炭化不均勻並使得強軸集成元(曝火面第 3 層)受到火害的影響，使得理論值與實驗結果稍有不同。

四、主要建議事項

本研究透過文獻回顧及初步的實驗結果，參考現行木構造建築設計及施工規範之規定，研議並提出未來針對直交集成板 CLT 在防火設計上的修訂方向及建議，主要建議事項如下。

建議一

研擬「木構造建築物設計及施工技術規範」第九章直交集成板 CLT 之增修條文：立即可行建議。

主辦機關：所內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究

根據本年度所完成的實驗成果及數據，建議研擬「木構造建築物設計及施工技術規範」第九章中，針對直交集成板 CLT 之增修條文建議。

建議二

彙整直交集成板 CLT 之防火設計原則出版解說手冊：中長期建議。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人台灣建築中心

建議內政部建研所可以本年度實驗及資料彙整成果為基礎，針對直交集成板 CLT 之防火設計原則出版解說手冊。

第一章 緒論

第一節 研究背景

近年來國際間木構造研究應用發展迅速，尤其「直交集成板(Cross Laminated Timber)」應用於建築結構材，在歐洲北美日本等國家已經有突破傳統木構造建築物規模及形式之案例。此種工程木材為良好的綠建材之一，各先進國家紛紛積極研訂相關產品標準及適用之建築規範，我國於 108 年 11 月 14 日公布國家標準 CNS16114 直交集成板，然國內木構造建築設計及施工規範仍尚未納入。由於國外發展案例已達國內法規認定為防火結構物之規模，目前國內雖有建築物採 CLT 構造之實績案例，但有關構造防火之性能部分仍須以建築新技術新工法新設備及新材料認可之機制逐一產品認可，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 構造防火設計應遵循之重點納入建築法規，減少 CLT 產品逐一認可之需要，並確保 CLT 構造建築物防火安全，因此有必要針對此課題進行相關研究，以提供國內建築管理之參考依據。

第二節 研究目的與重要性

有鑑於國內目前木構造建築限高 4 層樓，考量防火結構物之主要樓板及承重牆防火時效為 1 小時的情況下，因此本研究針對直交集成板 CLT 在 1 小時的火害下進行其炭化深度及火害行為之研究。主要研究方法透過考察歐洲、北美、日本等地有關直交集成板 CLT 之構造防火法規與規範，來探討國產及進口直交集成板 CLT 之防火性能。此外，透過實驗結果之驗證，研提「木構造建築物設計及施工技術規範」中直交集成板 CLT 構造防火規定之草案，並針對「木構造建築物防火設計施工參考手冊」中，有關直交集成板 CLT 構造專章內容提出增修建

議及草案。因此，本研究預計進行 2 組 CLT 樓板及 1 組 CLT 牆板之火害實驗，做為 CLT 構造專章內容及炭化層深度之驗證。

木構造建築在其建築材料具固碳上之優勢，及近年來工程木材技術漸趨成熟之影響，在各先進國家中漸漸受到重視。歐美日等先進國家，近二、三十年來已對現代木構造的建築型式及工程木材之應用有相當程度的掌握，尤其在耐震性、耐火性及耐久性等相关議題之研究，已有突破性的研究成果及應對策略。其中，針對現代化人口集中及中高層建築林立的都市中，木構造建築之高度限制也因為直交集成板 CLT (Cross Laminated Timber) 之技術研發與成熟得到長足的發展。直交集成板 CLT 在歐美日已通過各種防火、透氣性、隔音隔熱、耐風雨、天候及抗震等測試，可用於進行中高層木結構建築的設計中，然而台灣對於直交集成板 CLT 之基本防火性能等研究之基礎資料卻付之闕如。國內目前雖然已有直交集成板 CLT 建築實績與案例，但仍須以新材料新工法之評定方式驗證其防火之性能，因此當務之急則為透過相關基礎研究建我國直交集成板 CLT 之防火實驗及設計資料，以期未來可列為設計規範之制定及參考。本研究預期成果主要為：

- (1) 國外直交集成板 CLT 之法規綜整
- (2) 透過實驗探討直交集成板 CLT 之炭化深度及防火性能
- (3) 直交集成板 CLT 於 1 小時火害實驗後之強度評估

第三節 研究方法與步驟

直交集成板 CLT 在歐美日已通過各種防火、透氣性、隔音隔熱、耐風雨、天候及抗震等測試，可用於進行中高層木結構建築的設計中，歐美日等先進國家近年已針對直交集成板 CLT 之防火設計提出相關設計方法[3-11]，本研究預計透過文獻回顧分析及實驗驗證的方式建立國內基礎資料。實驗方面，規劃直交集成板

CLT 之炭化深度實驗及防火性能之確立，透過 1 小時之火害實驗確立不同材種之 CLT 樓板及牆板在加載下之炭化深度。另外，火害後之試體進一步透過三分等載重實驗確定火害後之殘餘強度，並參考各國相關規定，提出國內 CLT 樓板在火害後之殘餘強度評估公式。整體研究流程如圖 1-1，研究進度及預期完成之工作項目如表 1-1 所示。

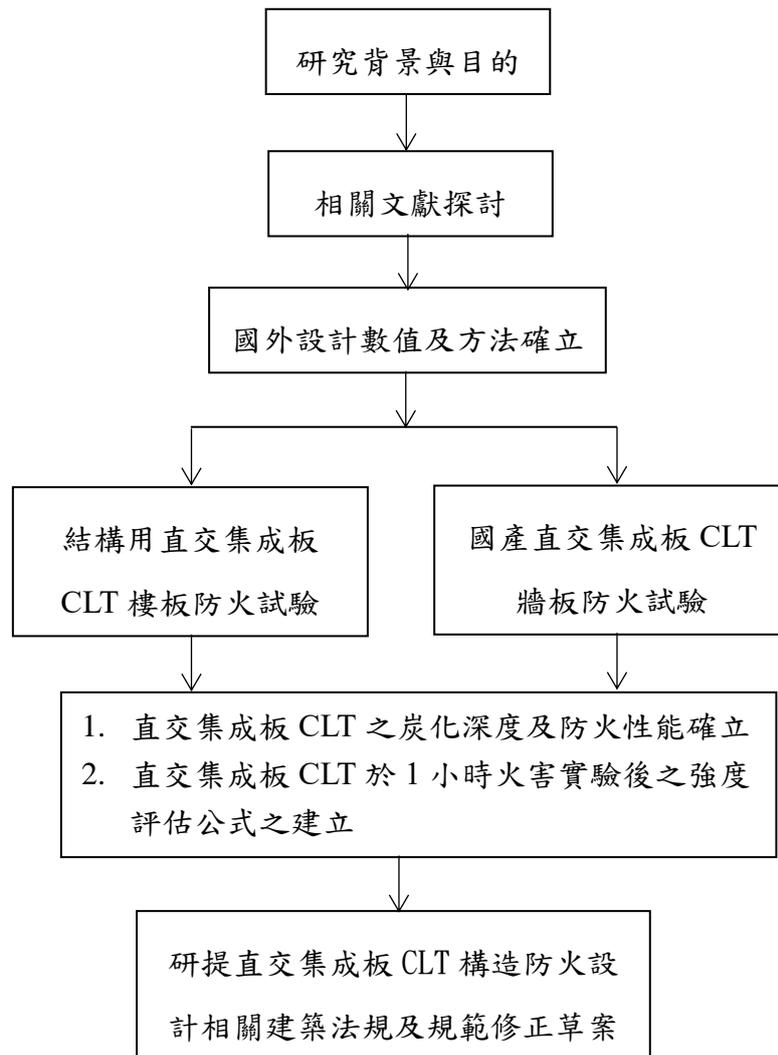


圖1-1 研究流程

直交集成板(CLT)構造防火設計之研究

表1-1 研究進度及預期完成之工作項目

工作項目 \ 月	第 1 個月	第 2 個月	第 3 個月	第 4 個月	第 5 個月	第 6 個月	第 7 個月	第 8 個月	第 9 個月	第 10 個月	第 11 個月	備註
資料收集與分析	■	■	■	■	■	■	■					
第 1 次專家會議				■								
直交集成板 CLT 國外防火規範比較分析		■	■	■	■							
實驗規劃		■	■	■	■							
第 2 次專家會議						■						
期中報告					■							
實驗執行				■	■	■	■					
研提直交集成板 CLT 之防火設計規定草案						■	■	■				
第 3 次專家會議									■			
期末報告							■	■	■	■	■	
預定進度 (累積數)	4%	14%	24%	36%	48%	58%	70%	82%	94%	98%	100%	

第二章 文獻回顧

本研究首先透過文獻回顧探討國際上針對 CLT 進行規範制定時，所關注的議題等。文獻回顧除了探討炭化深度及速率，對於火害後之殘餘強度亦進行資料收集及研究。

火害後之材料強度方面，本文獻針對 12 隻單向跨距且尺寸為 2000×300×100 mm³ (長×寬×厚) 之 CLT 樑進行三分等抗彎試驗[12]，層數分別為三層及五層，於室溫下控制位移進行四組對照試驗。圖 2-1 為非標準加熱試驗及以 Eurocode 5 預測之炭化深度及炭化率，結果顯示，於所有條件下試驗之炭化深度均小於預測值。因 EC5 假定炭層於開始加熱時立即生成，但實際情形並非如此，加熱開始後約 10 min 後開始炭化，且炭化層並非以恆定速率生成，EC5 進行之簡化假設僅對根據 ISO 834 以耐火測試爐進行試驗者有效。表 2-1 為提出與 EC5 預測值進行比較及破壞時間與零強度層厚度之試驗數據，由表 2-1 可發現，施加不同水平之持續載重對炭化層形成並無顯著影響。

表2-1 不同膠合層數下之炭化深度建議

Parameter	Five-layer				Three-layer				
	F5-20-1	F5-20-2	F5-10-1	F5-10-2	F3-20-1	F3-20-2	F3-10-1 ^a	F3-10-2	
Char response	Depth of char layer at failure (mm)	38.5	37.2	46.0	43.1	19.6	19.1	25.5 ^a	44.5
	Depth of char layer expected based on Eurocode 5 (mm)	48.1	49.4	55.9	55.3	24.7	25.4	39	57.9
	Time to failure (mins)	74	76	86	85	38	39	60 ^a	89
	Equivalent Eurocode charring rate (mm/min)	0.52	0.49	0.54	0.51	0.51	0.49	0.43 ^a	0.50
Zero-strength layer	Depth of reduced section at failure (mm)	61.5	62.8	54.0	57.0	80.5	80.9	74.5 ^a	55.5
	Depth required assuming 100% strength (mm)	43.7	43.7	40.0	40.0	67.6	67.6	30.7 ^a	30.7
	Depth of zero-strength layer at failure (mm)	17.8	19.1	14.0	16.9	12.8	13.2	43.7 ^a	24.8

^a Test halted prior to true failure.

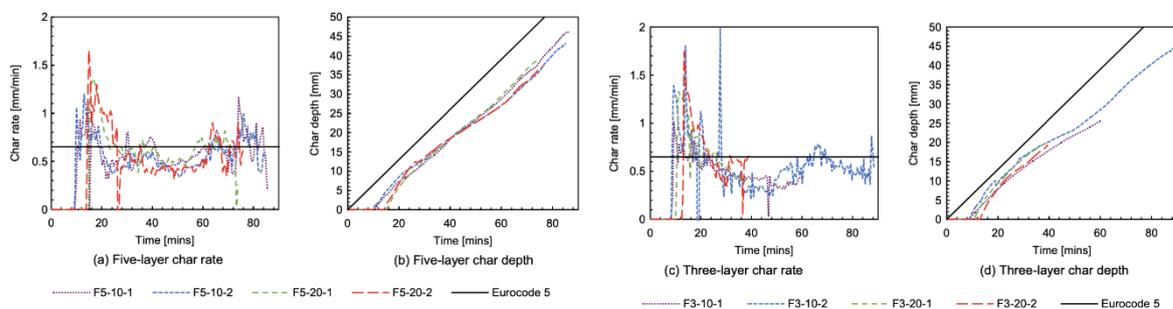


圖2-1 非標準加熱試驗及以 Eurocode 5 預測之炭化深度及炭化率

炭化速率方面，為探討受壓縮負載 CLT 由一側暴露加熱時之熱及機械行為，本文獻共進行八項試驗，其中四項於室溫下進行，其餘四項則施加持續載重並以恆定熱通量入射進行耐燃試驗[13]。試材由三聚氰胺甲醛樹脂膠合之雲杉-松木 CLT 進行裁切且，尺寸為 1700×300×100 mm³，使用 3 層及 5 層，厚度分別為 33-34-33 mm 及均為 20 mm。圖 2-2 為室溫下軸向及橫向之載重撓曲圖，橫向撓曲最初為線性關係，但由於設置中出現難以避免之中立軸位移，因此於較高荷重下橫向撓曲增加導致二次彎矩積累，最終發生挫曲破壞及外層軸向彎曲破壞。

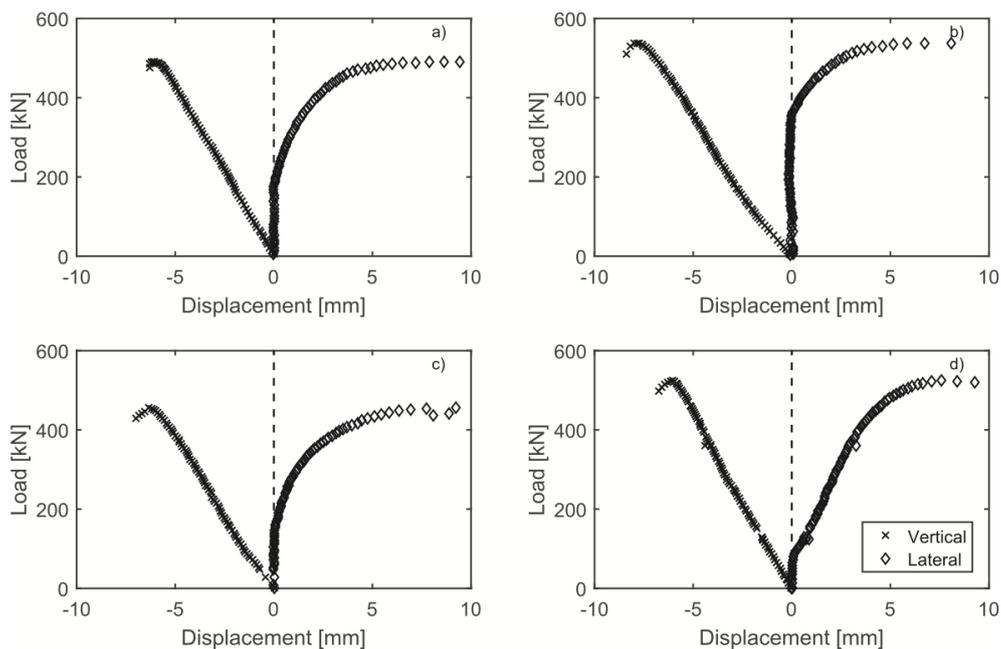


圖2-2 室溫下軸向及橫向之載重撓曲圖

圖 2-3 為耐燃試驗測得之炭化深度及炭化率，使用與三次多項式曲線對應之深度及溫度數值以最小平方法近似 300oC 等溫線之位置。因輻射板於達到穩態輻射輸出前需加熱並將木材表面加熱至 300oC，故於試驗開始前 5 min 並無炭化，而所有試驗均顯示炭化率之初始峰值，而後降低並接近普遍認知之針葉樹一維炭化率 0.65 mm / min，但下表所示因最初峰值導致平均炭化率略大於 0.65 mm / min，此可能為炭化表面對流氣體中氧氣含量較高導致炭化加速。

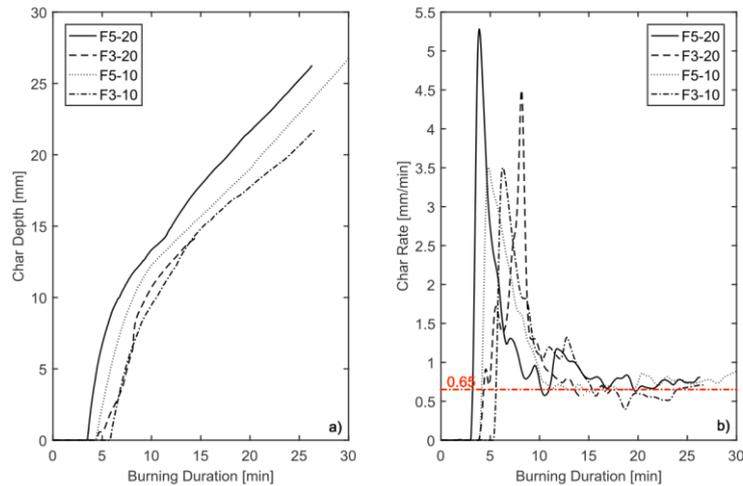


圖2-3 耐燃試驗測得之炭化深度及炭化率

另外，為探討各樹種及 CLT 於穩態燃燒狀態下，發生自熄滅之臨界質量損失速率及臨界熱通量，將試材由外部通入熱量直至著火，後將其燃燒 10-15 min 以確保穩態燃燒，再降低熱通量直至燃燒停止[14]。本試驗目的之一為探討實木及 CLT 於不同密度及樹種間自熄滅時之臨界質量損失速率與臨界熱通量之變化，於試驗中使用多種熱通量（20–100 kW/m²）其涵蓋隔室火災常見之熱通量，各試驗間區別為試材之加熱面積及厚度，但由於錐形加熱器均勻加熱之特性及不同試驗持續時間，使樣品尺寸影響得以最小化，因此可以直接對木材種類進行比較。表 2-2 為不同樹種穩態燃燒之臨界質量損失速率及臨界外部熱通量，臨界質量損失率受木材種類及特定化學組成影響，可得知臨界質量損失率似乎與樹種有關。

表2-2 不同樹種穩態燃燒之臨界質量損失速率及臨界外部熱通量

Species	Critical Mass Loss Rate [g/m ² s]	Critical Heat Flux [kW/m ²]
European Spruce (<i>Picea abies</i>)	3.93 ± 0.4	43.6 ± 4.7
Radiata Pine (<i>Pinus radiata</i>)	3.65 ± 0.2	44.6 ± 0.9
Red Ironbark (<i>Eucalyptus sideroxylon</i>)	7.20	52.5
Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	8.28 ± 1.9	56.6 ± 2.1
Kumaru (<i>Dipteryx odorata</i>)	5.12 ± 0.6	36.1 ± 2.6
Blackbutt (<i>Eucalyptus pilularis</i>)	2.65 ± 0.5	24.1 ± 2.8

以加拿大鐵杉製造之 CLT 進行防火性能試驗，於環境溫度及標準燃燒條件下，測試了 10 種不同厚度及層數之 CLT，以探討室溫下之撓曲能力及燃燒試材之溫度分佈、炭化率、耐火性及撓曲能力[15]。在耐火試驗期間，除 F-3L-15 和 F-3L-20 外所有樣品均清楚地觀察到焦炭層的局部脫落，導致內部新鮮材面直接暴露於火中，使某些 TC 的溫度迅速升高並達到了爐溫，炭層脫落時間因樣品不同而異。與燒焦的三層試樣第一層完全掉落不同，五層試樣並無觀察到焦炭層掉落時間的明顯趨勢。由上述情形可推論，當使用較薄之集成元時，炭層之局部脫落係導致試材快速升溫之主要關鍵。將截面中的 300oC 等溫線視為炭化線炭化，由 TC 讀數及殘於橫截面計算之炭化率如下右圖所示。由每個 TC 測得大部分炭化率均高於根據歐洲規範 5 的一維炭化最大額定值 (0.65 mm / min)，主要係由於炭化層脫落所致，另一個原因是，CLT 面板中使用之集成元並無側拼膠合，變形隨著火勢及發展，個集成元之間隙逐漸增大，導致局部受二維火焰暴露使總體炭化率提升。

表2-3 加拿大鐵杉燃燒試材之防火性能試驗表

Table 1. Summary of ambient and fire tests.

Specimen number	Number of lamellae	Test condition	Applied load	Ultimate load (kN)	Load ratio (%)	Fire resistance (min)	FE model results
A-3L-1	3	Ambient	6 mm/min	79.1	–	–	84.9 kN
A-3L-2	3	Ambient	6 mm/min	69.0	–	–	
A-5L-1	5	Ambient	6 mm/min	46.3	–	–	58.5 kN
A-5L-2	5	Ambient	6 mm/min	54.1	–	–	
F-3L-10	3	ISO-834	9.3 kN/m ²	–	8	65	54 min
F-3L-15	3	ISO-834	16.3 kN/m ²	–	14	32	34 min
F-3L-20	3	ISO-834	21.0 kN/m ²	–	18	27	29 min
F-5L-10	5	ISO-834	7.0 kN/m ²	–	9	70	68 min
F-5L-15	5	ISO-834	11.2 kN/m ²	–	14	65	61 min
F-5L-20	5	ISO-834	14.0 kN/m ²	–	18	57	56 min

FE: finite element.

A: ambient tests; F: fire resistance tests; 3L or 5L: three-ply or five-ply.

另外，為探討高溫下 CLT 常用膠合劑之機械強度以釐清剝離現象之發生，分別對實木進行拉伸試驗及對實木與膠合材進行拉伸剪切試驗[16]。圖 2-4 可以得知 PRF 於所有試驗溫度下與實木具相似之強度，且於 260oC 下大多數膠合劑

與實木間之剪切強度差異最大，於此溫度下與實木進行比較，PUR1 之強度僅為實木之 30%、PUR2 仍為實木之 60% 以上、而 MF 之強度則為實木之 85%。

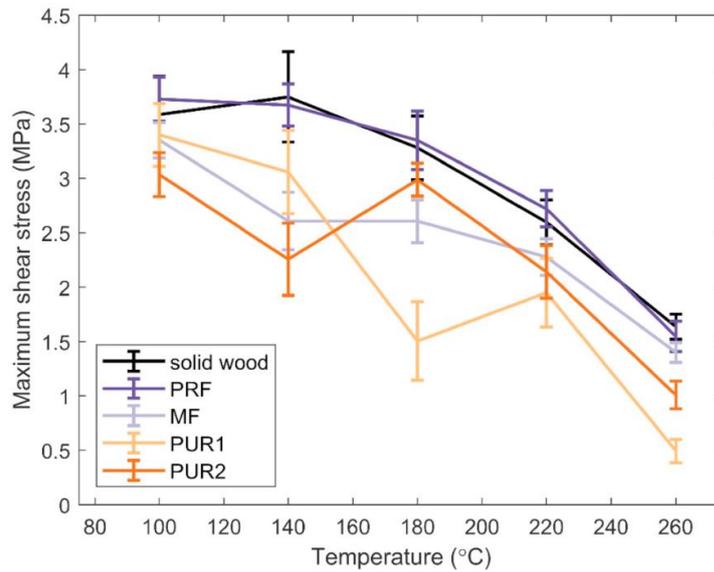


圖2-4 PRF 於所有試驗溫度下與實木具相似之強度

根據 CLT 進行多次耐火試驗結果以及根據當前以 EN 1995-1-2 的耐火設計，提出了一種針對木材及 CLT 的新型炭化模型。此外，透過 CLT 進行多次耐燃測試獲得之炭化深度與基於歐洲炭化模型的結果進行了比較[17]。試驗結果表明，使用名義炭化率 β_n 可確定 CLT 之剩餘橫截面，若考慮 CLT 之結構，通過將一維基本設計炭化率 β_0 與不同係數 k 相乘以計算名義炭化率 β_n 。而炭化層是否會脫落取決於膠合劑及 CLT 組成之層數及厚度。此外，CLT 元件之耐火性與炭化率並不成線性關係，因具有低剛度及低強度之直膠層的炭化幾乎不會對整體承載產生影響於設計上，為確定樓板炭化深度應考慮兩種情形，若 CLT 各個炭化層並未脫落，則形成之炭化層可保護剩餘的 CLT 橫截面以免受熱侵害，在此情況下其火災行為與實木相似；若發生炭化層局部脫落，其防火功能將喪失，新鮮材面直接暴露於火場中，此現象類似於在防火披覆失效後於受保護的木材表面觀察

到的炭化現象增加 (圖 2-5)，可考慮於前一層掉落後下一層最初 25 mm 使用雙倍炭化率來考慮。

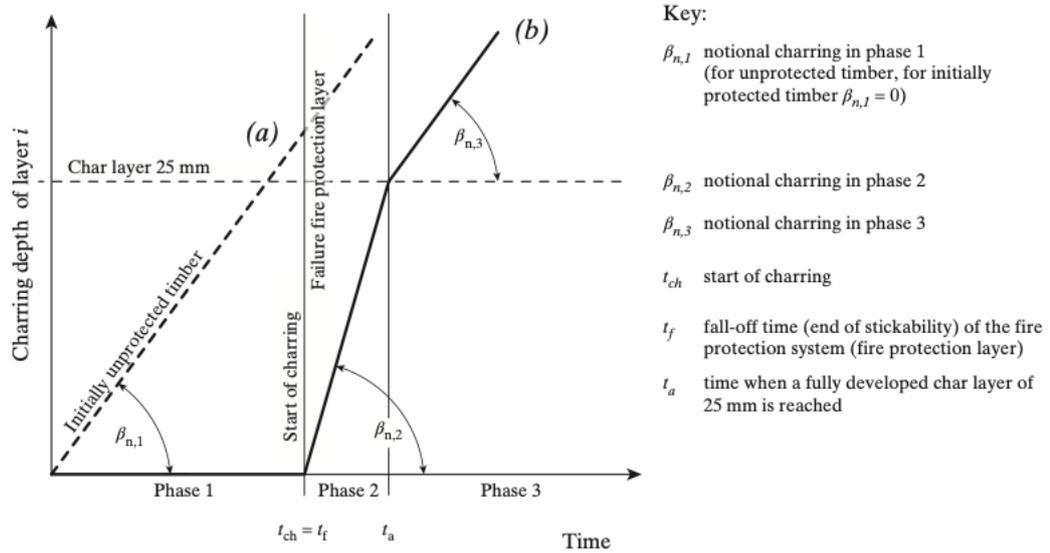


圖2-5 防火披覆失效後於受保護的木材表面觀察到的炭化現象增加

由以上文獻回顧可知，由於 CLT 具有縱向和橫向層的結構，其暴露於火時具有復雜之性能。故於設計上，由於有效橫截面方法係考慮熱量所造成強度及剛度之降低，因此若剩餘橫截面位於橫向層中，零強度層為非承重層的一部分，與零強度層為承重層的一部分相比，其厚度必須相應地增加。但當前以 EN 1995-1-2 進行設計並未考慮任何一種情況，由此解釋為何於歐洲用於 CLT 防火設計之零強度層厚度並非 7 mm 定值。

第三章 研究方法及實驗規劃

第一節 研究方法

3.1.1 炭化速率之研究

木材在表面燃燒時會形成炭化層。炭化層會阻斷木材燃燒所必要氧氣，因此具有保護炭化層內層之主要結構之效果。另外，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且炭化層具有阻熱效果，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。本研究預計採用 ISO834-1 之加熱曲線，進行直交集成板 CLT 樓板及牆板之 1 小時火害實驗，預期實驗結果可與國外實驗結果進行比較驗證。Eurocode 5 (EU5) 所定義之炭化深度計算方式(3-1)，可知針對實木及集成材之密度大於 290 kg/m^3 ，其炭化速率均可以表 3-1 之數值求得。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(式 3-2 及表 3-2)，提供炭化深度之基本設計方式。

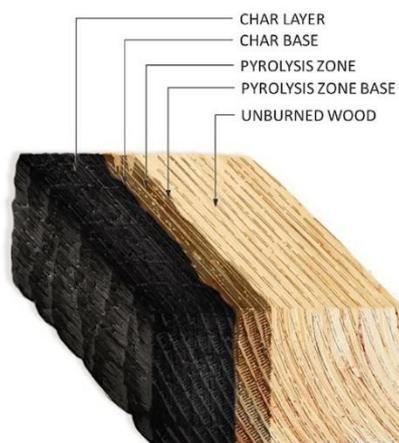
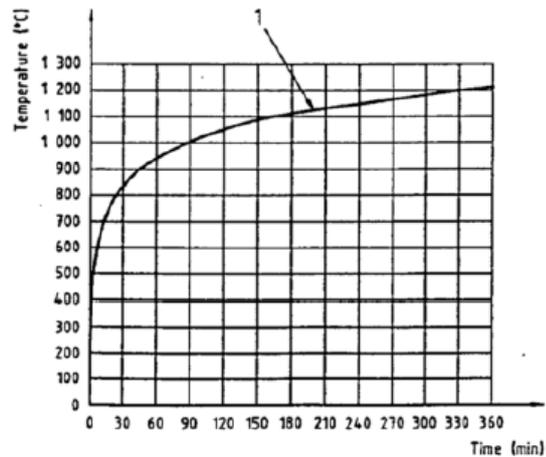


圖3-1 木材燃燒炭化層



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

圖3-2 防火實驗加熱曲線 ISO834-1

雖然 EU5 以及 NDS 對於炭化速率的規定主要用來規範實木及集成材，然其規範中亦提到此炭化速率亦可作為 CLT 炭化層設計之參考。另外，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，其中炭化速率之計算分為制式工法採固定炭化深度計算，但若膠合層較為特殊則可採炭化速率的方式來計算炭化層。本研究進行日本扁柏 CLT 樓板及北美花旗松 CLT 樓板之實驗，採實驗驗證之方式，參考比較各國之實驗數據及結果，以供國內提出較適合國內使用之炭化深度設計值。

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (3-1)$$

$d_{char,n}$: 炭化深度 β_n : 炭化速率 t : 燃燒時間

表3-1 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

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

$$a_{char} = \beta_{eff} t = 1.2\beta_n t^{0.813} \quad (3-2)$$

表3-2 北美 CLT Handbook(參考 NDS 之數據)所建議之炭化深度速率

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

3.1.2 火害實驗後殘餘強度之研究

直交集成板 CLT 由於各膠集成元間之木材纖維方向成 90 度垂直，因此對於樓板而言會有明顯的強弱軸之分。根據北美 CLT Handbook 以及日本 CLT 施工設計手冊之建議，將弱軸方向之集成元彈性模數 E 及剪力模數 G 假設為零($E_{90}=G_{90}=0$)，為評估直交集成板 CLT 在火害後之殘餘斷面積強度時，較為適當的評估方法。由於弱軸方向之集成元不提供強度，因此火害後殘餘結構斷面之中立軸會產生偏移，造成整體結構斷面等值 EI 的改變。此時可先透過公式(3-3)求得殘餘斷面之中立軸位置。

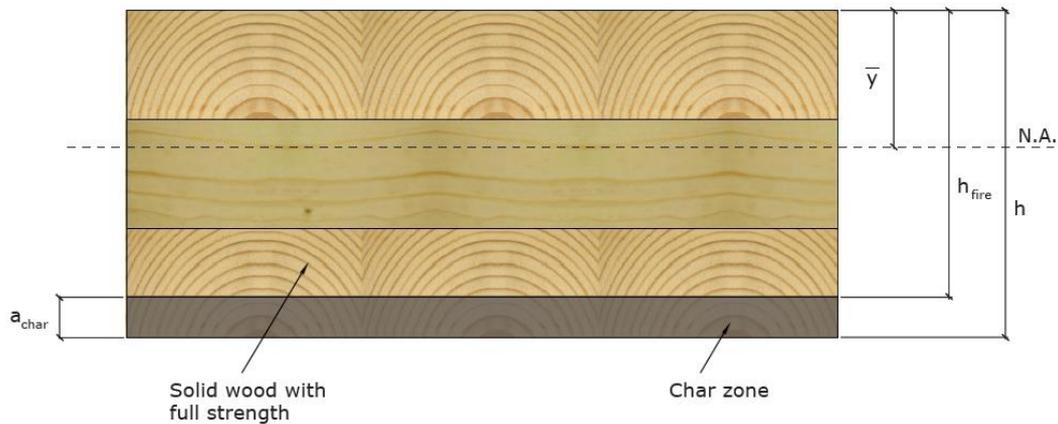


圖3-3 CLT 火害後之炭化層及殘留斷面[6]

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i h_i E_i}{\sum_i h_i E_i} \quad (3-3)$$

其中：

\bar{y} : 未燃燒面至中立軸之距離(cm)

y_i : 未燃燒面至第 i 層型心之距離(cm)

h_i : 第 i 層厚度(cm)

E_i :第 i 層主軸之彈性模數(kgf/cm²)

當中立軸位置求得後，接著可利用平行軸定理求得殘餘斷面之等值 EI，公式(3-4)為假設直交集成板 CLT 在各層所選用的材種不盡相同的條件下，所進行的計算方式。若是選用相同等級材種的 CLT，則公式(3-4)可以改寫成公式(3-5)，亦即此時材料所造成的影響可以忽略不計。

$$EI_{eff} = \sum_i \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_i b_i h_i d_i^2 E_i \quad (3-4)$$

其中:

EI_{eff} :等值抗彎勁度(kgf·cm²)

d_i :中立軸到第 i 層型心距離(cm)

b_i :CLT 板寬(cm)

h_i :第 i 層厚度(cm)

$$I_{eff} = \sum_i \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_i b_i h_i d_i^2 \quad (3-5)$$

其中:

I_{eff} :等值慣性矩(cm⁴)

此方法於世界各國均可適用，目的在檢證非一般制式膠合的 CLT 板(例如每層厚度不一、或是強弱軸膠合層非單一層等情況)。本研究亦透過本方法推導因炭化層產生導致 CLT 板之等值 EI 值衰減趨勢，提供後續進行規範制定時之參考。

第二節 火害實驗設備及規畫

本研究使用內政部建築研究所防火實驗中心之設備，主要針對建築物防火構造及防火設備之耐火性能研究，實驗室內設柱、梁、柱梁接頭、樓版、屋頂、牆、門窗耐火加熱爐與加載設備及其相關實驗設施。直交集成板 CLT 之樓板及牆板實驗則主要使用以下兩個重要儀器：

(1) 樑、柱複合耐火試驗爐

本設備用於建築物樑、柱、樓版構件防火時效測試，測定其承重能力、遮焰性、阻熱性等性能，以區分測試構件之防火時效。柱高最高可達4公尺，最大加載可達2000噸；梁最長跨距為8公尺，最大集中加載為100噸，最大均佈加載為200噸；樓版尺寸為4×8公尺，最大加載70~1000 kgf/m²。

(2) 門牆耐火實驗爐。

本設備用於建築物防火門、防火捲門、窗、牆構件防火時效測試，測定其承重能力、遮焰性、阻熱性等性能，以區分測試構件之防火時效。加熱面積：寬4.3m高4.5m，最大加載可達60噸。



圖3-4 梁、柱複合耐火試驗爐



圖3-5 門牆耐火實驗爐

(3) 實驗規劃

本研究預計進行 2 組 CLT 樓板及 1 組 CLT 牆板之火害實驗，做為 CLT 構造專章內容及炭化層深度之驗證。規劃之 2 組 CLT 樓板分別為 5 層 15cm 之日本扁柏直交集成板 CLT，以及 5 層 17.5cm 之北美花旗松直交集成板 CLT。樓板實驗試體材料之規劃主要選取北美及日本常用之材種進行加工製作，以符合未來應用之廣泛性及適用性。另外，本實驗亦規畫使用國產柳杉所加工製作的直交集成板 CLT 來進行實驗，然而考量目前國內直交集成板 CLT 之加工無法達到樓板火害實驗爐之尺寸大小，因此本研究規劃以 1 組 5 層 18cm 之國產柳杉直交集成板 CLT 牆板來進行 1 小時之火害試驗，作為驗證國產柳杉之 1 小時防火性能之用。

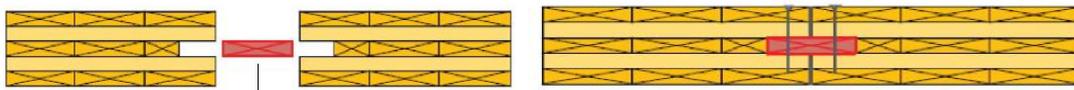
直交集成板 CLT 在進行樓板及牆板的 1 小時火害實驗方面，本研究參考 CNS12514-4/A3305-4「建築物構造構件耐火試驗法-第 4 部:承重垂直區劃構件特定要求」，以及 CNS12514-5/A3305-5「建築物構造構件耐火試驗法-第 5 部:承重水平區劃構件特定要求」來進行，目的在模擬火害時於樓板及牆板上加載情況下之結構行為。此外，實驗用直交集成板 CLT 採用我國於 108 年 11 月 14 日公布國家標準 CNS16114 中所定義之形式。針對直交集成板 CLT 於 CNS16114 內文

中作為結構用途時，其規定為「若要做為建築結構用途，則可參考 **ISO 16696-1** 並應依建築主管機關法規規定。」。因此，本研究實驗所使用的北美及日本直交集成板 CLT，均符合 ISO 16696-1 之規定，並根據 CNS12514-5/A3305-5「建築物構造構件耐火試驗法-第 5 部:承重水平區劃構件特定要求」進行加載及火害實驗。另外，國產柳杉之直交集成板 CLT 牆板之實驗試體，則根據現行「CNS16114-直交集成板」之製作方式進行加工製造，並根據 CNS12514-4/A3305-4「建築物構造構件耐火試驗法-第 4 部:承重垂直區劃構件特定要求」進行加載及火害實驗。

第三節 實驗試體組裝

3.3.1 日本扁柏 CLT 樓板之組裝

本實驗模擬單向樓板在載重情況下之火害情況，對於 CLT 樓板而言會有強弱軸之差異，亦即纖維方向平行樓板支撐方向的為強軸，提供主要的抗彎強度。纖維方向垂直樓板支撐方向的則為弱軸，理論上不提供抗彎強度。本實驗所使用之 5 層 15cm 日本扁柏 CLT，單片尺寸為 160x440cm，第 1,3,5 層屬於強軸方向，亦即纖維方向平行支撐方向。由於試驗框架尺寸為 303x440cm，配合試體框架尺寸及滾支承設置位置，將兩片 160x440cm 之 CLT 試體利用“single internal spline”的拼接方式進行拼接(圖 3-6)，拼接後進行裁切加工以符合試體框架尺寸 303x440cm。



(a) single internal spline



(b) 現場拼接流程

圖3-6 單片 160x440cm 日本扁柏 CLT 之拼接

實驗過程中，為了避免火焰從試驗框架及實驗試體間竄出，於試體下方與實驗框架交界處佈置防火棉。施作方式為將實驗框架架高後(圖 3-7a)，在試體底部四邊的縫隙塞防火棉，並用 U 型夾及黑膠噴霧固定(圖 3-7b)，防止掉落。以上步驟完成後，則可進行試體之測溫點及測溫線之配置。



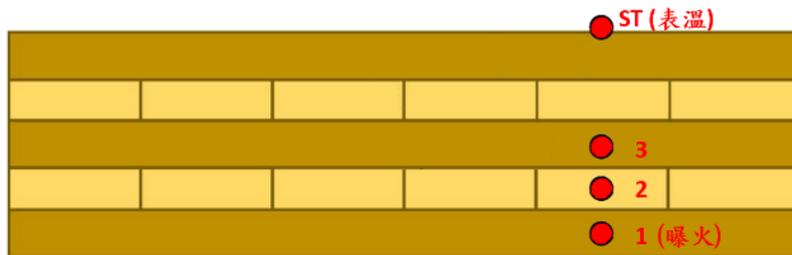
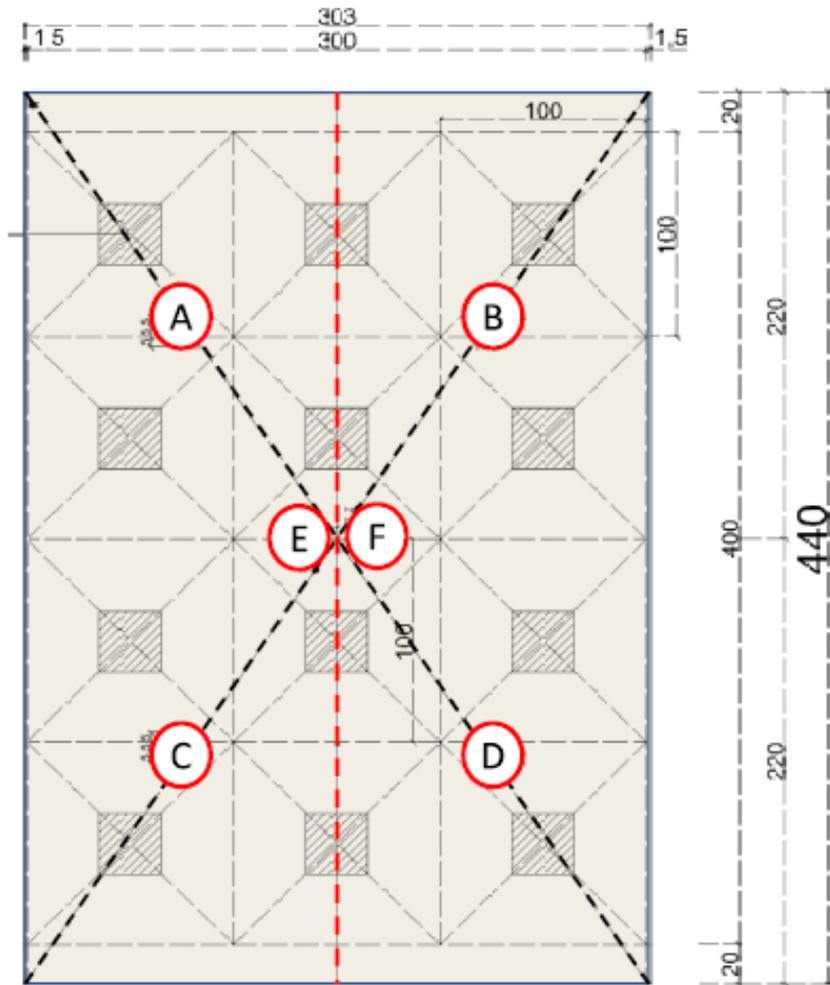
(a). 實驗框架架高並佈置防火棉

(b). 以 U 型夾固定防止掉落

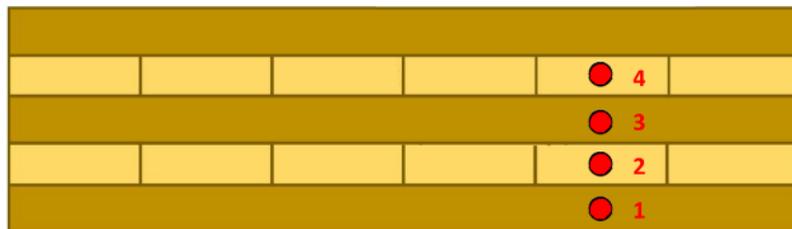
圖3-7 防火棉佈置

(1) 佈設測溫點及安裝測溫線:

首先將 12 處載重塊的位置標示出來，確保測溫點與載重塊沒有重疊的問題後，再利用打線器標出中心點，並將試體分成等分十字四象限，分別為 A、B、C 及 D 處及中心點分別往左右兩側 7.5 公分為 E 及 F 處，且 A、B、C 及 D 處往板中心點，每 5 公分佈設 1 測溫點，又分成 \odot ST:表面溫度 $\textcircled{B}1$:CLT 第 1 層(曝火層) $\textcircled{C}2$: CLT 第 2 層 $\textcircled{D}3$:CLT 第 3 層；另外 E 及 F 處往板緣，每 5 公分佈設 1 測溫點，又分成 $\textcircled{B}1$:CLT 第 1 層(曝火層) $\textcircled{B}2$: CLT 第 2 層 $\textcircled{C}3$:CLT 第 3 層 $\textcircled{D}4$:CLT 第 4 層；最後中心點往左 5 公分處另設 ST-M，測板中心點之表面溫度(如圖 3-8 所示)。利用 7mm 的鑽孔器，利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，以避免防火泥包覆測溫端部，造成量測阻礙，最後再灌入防火泥。

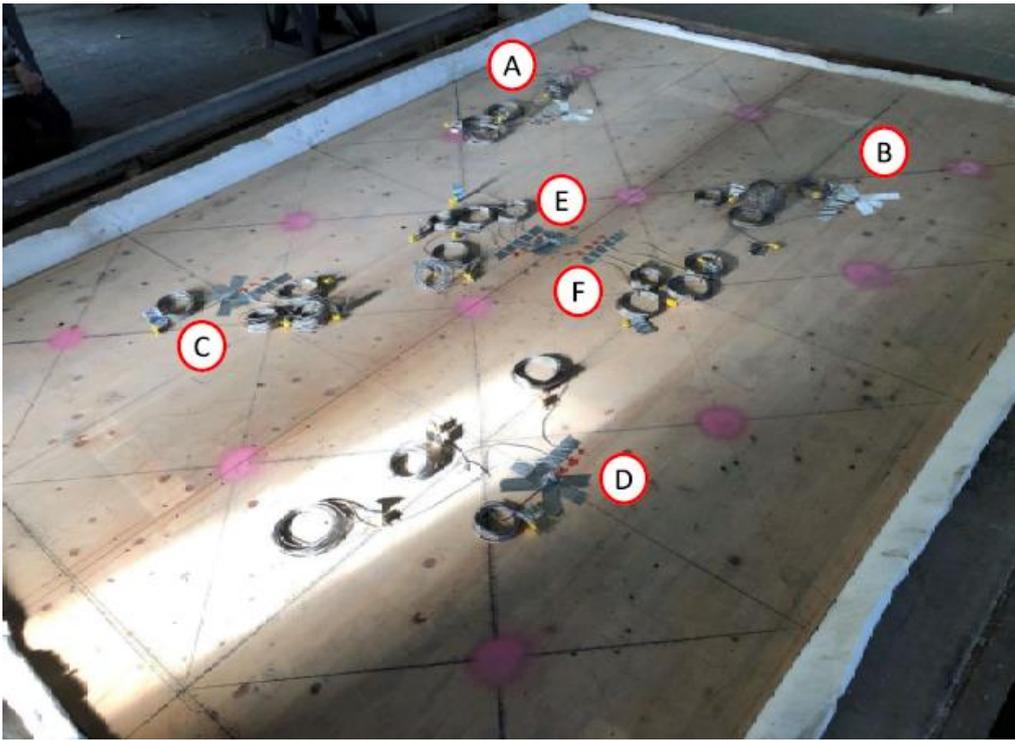


日本扁柏樓板之A、B、C、D處測溫線設置方式



日本扁柏樓板之E、F處測溫線設置方式

(a). 測溫點規劃及各點位之測溫線埋設深度(單位:cm)



(b). 溫點與試體關係圖

圖3-8 測溫點與測溫線示意圖

(2) 佈設測溫棒、試體表面防火棉及數據設定

由於上幾次試驗的試體燃燒產生的灰燼或是生鏽會附著於端部，都會影響到測溫棒對溫度的敏感性，所以將測溫棒端部用電動鐵刷清理；之後在試體四週空隙處塞入防火棉，最後吊入爐內；將 25 條測溫線佈整好，依序插入電腦機台，並設置好 Numeric Monitor 的數據，並逐一檢查每個測溫孔等數據是否無異常。



圖3-9 佈設測溫棒

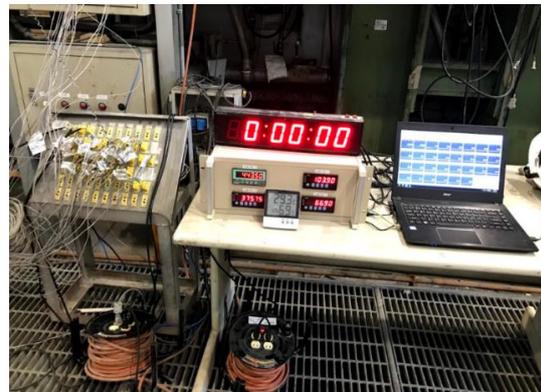


圖3-10 測試測溫孔數據是否無異常

(3) 佈設載重塊及位移器:

第 1 次實驗於樓板試體上加載 $300\text{kgf}/\text{m}^2$ 之載重，雖然加載之載重參考建築技術規則中商業用途建築之活載重加載，然本研究預計進一步分析加載及試體在燃燒時的變形曲線，推估試體在曝火面積消失的情況下，其強度折減之估算式。佈設載重之方式為將 300kgf 的載重塊(含磚塊)放置於試體每平方公尺之面積上(如圖 3-11 及 3-12 所示)。在載重塊佈設完成後，為了確保試體在實驗過程中之撓曲變形可以被詳實記錄，因此在試體中心點處以及沿牆軸方向約 100 公分處(如圖 3-13)，分別設置 1 個位移器，紀錄試體的撓曲變形。

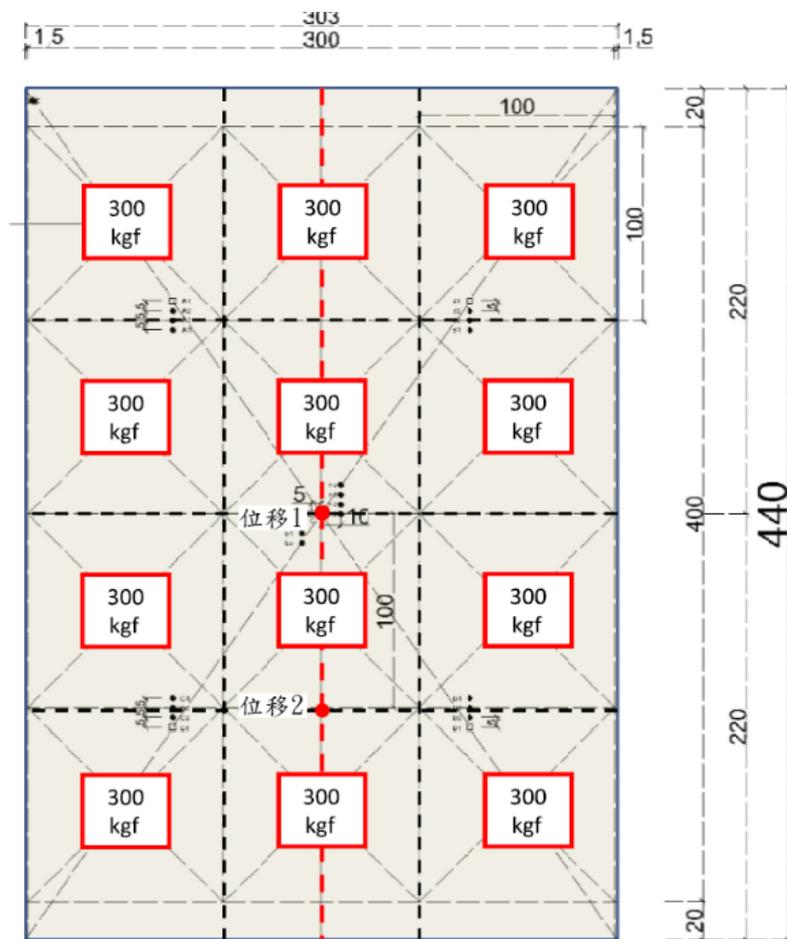


圖3-11 載重塊之配置及位移計之架設位置(單位:cm)



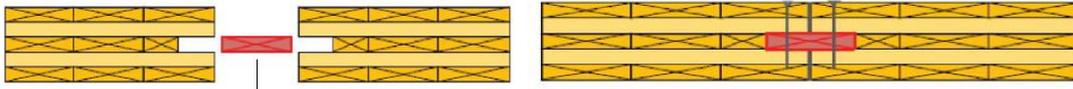
圖3-12 載重塊配置完成



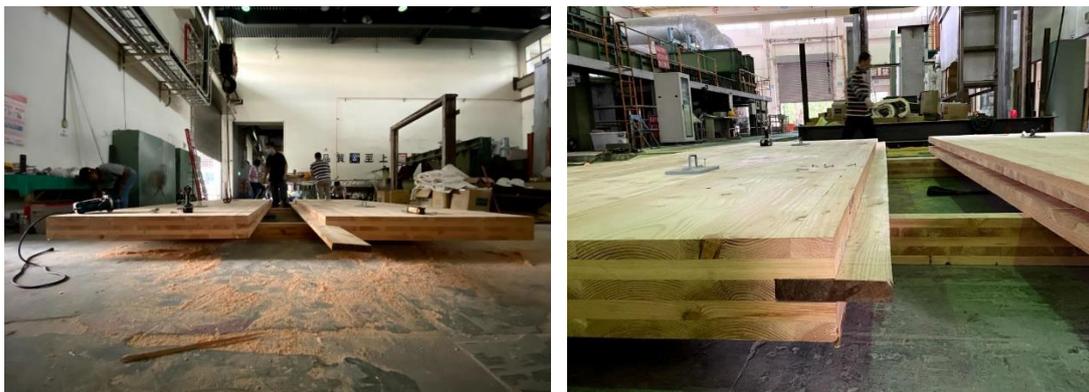
圖3-13 位移計之架設

3.3.2 北美花旗松 CLT 樓板之組裝

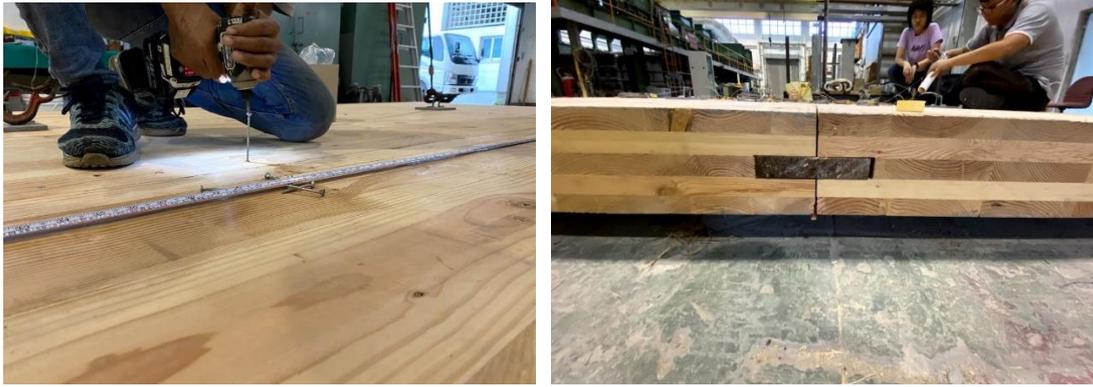
北美花旗松 CLT 亦模擬單向樓板在載重情況下之火害情況，以纖維方向平行樓板為強軸進行樓板支承點配置。纖維方向垂直樓板支撐方向的則為弱軸，理論上不提供抗彎強度。本次實驗用之 5 層 17.5cm 美國花旗松，將單片 151.5*432cm 之 CLT 板以”Single internal spline”工法將兩片板材接合，尺寸長寬為 432*303(cm)。配合試體框架尺寸及滾支承設置位置，樓板試體拼接後尺寸為 303*432(cm)。



(a) single internal spline



(b)兩片 CLT 板以 Single internal spline 工法將兩片板材接合



(C) 利用螺絲將拼接處固定及完成後狀態

圖3-14 單片 151.5*432cm 美國花旗松 CLT 之拼接

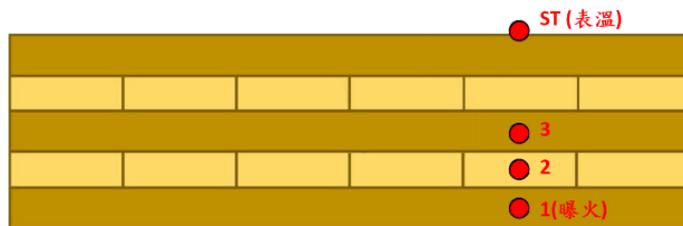
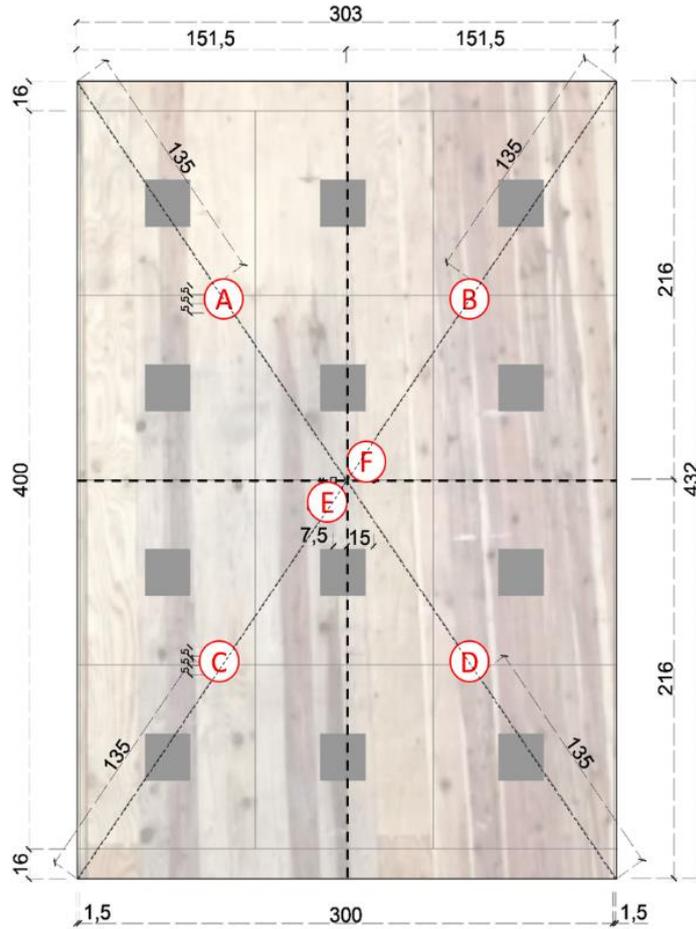
(1) 佈設測溫點及安裝測溫線:

首先利用打線器標出中心點及 12 處載重塊佈置位置，確保測溫點與載重塊無重疊的問題，在十字四象限處分別標示 A、B、C、D 處，並在中心點之左右兩側設 E 及 F 處，且 A、B、C、D 處每往板中心處每 5 公分佈設一點側溫點，標示方法⊙ST:表溫層 ⊙1:CLT 第 1 層(曝火層)⊙2: CLT 第 2 層⊙ 3:CLT 第 3 層。

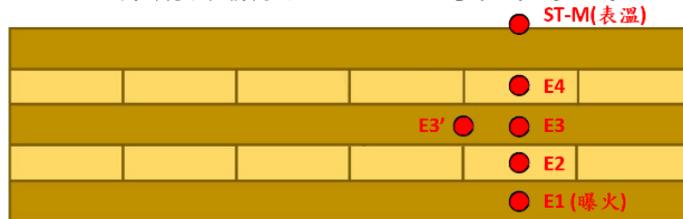
E 處往左 7.5 公分，且往板緣處延伸，每 5 公分佈設一點測溫點，標示方法⊙1:CLT 第 1 層(曝火層) ⊙2: CLT 第 2 層 ⊙3:CLT 第 3 層 ⊙4:CLT 第 4 層，另外由於 E3 設置在填木內，所以又另外再 E3 點往左 7.5 公分設置一點 E3'。

F 處往右 15 公分，且往板緣處延伸，每 5 公分佈設一點測溫點，標示方法⊙1:CLT 第 1 層(曝火層) ⊙2: CLT 第 2 層 ⊙3:CLT 第 3 層 ⊙4:CLT 第 4 層；，以測溫差與否，最後中心點往左 7.5 公分處(避開接縫)另設 ST-M，測表面溫度。

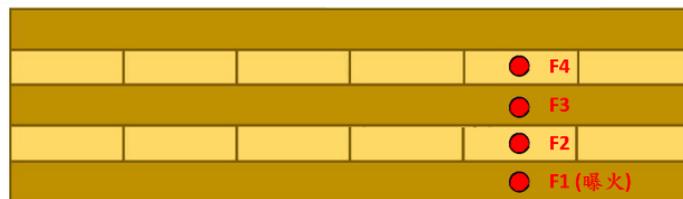
佈線方法:在鑽孔針上利用綁線的方式標示出鑽孔深度後，開始依層鑽孔，鑽孔後放入些許木屑，避免防火膠包覆測溫端部，造成量測阻礙，最後再灌入防火泥。



美國花旗松樓板試驗之A、B、C、D處測溫線設置方式



美國花旗松樓板試驗之E處測溫線設置方式



美國花旗松樓板試驗之F處測溫線設置方式

圖3-15 測溫點規劃及各點位之測溫線埋設深度(單位:cm)

(2) 佈置試體防火棉:

將試體架放入框架並在四周設置防火棉，架高後在試體底部四邊及的縫隙塞防火棉，並用 U 型夾及黑膠噴霧固定，防止掉落。

(3) 佈設測溫棒、佈線及數據設定及載重配置:

第 1 次實驗於樓板試體上加載 $300\text{kgf}/\text{m}^2$ 之載重，雖然加載之載重參考建築技術規則中商業用途建築之活載重加載，然本研究預計進一步分析加載及試體在燃燒時的變形曲線，推估試體在曝火面積消失的情況下，其強度折減之估算式。佈設載重之方式為將 300kgf 的載重塊(含磚塊)放置於試體每平方公尺之面積上(如日本扁柏試體之配置)。在載重塊佈設完成後，為了確保試體在實驗過程中之撓曲變形可以被詳實記錄，因此在試體中心點處以及沿牆軸方向約 100 公分處(如圖 3-17)，分別設置 1 個位移器，紀錄試體的撓曲變形。

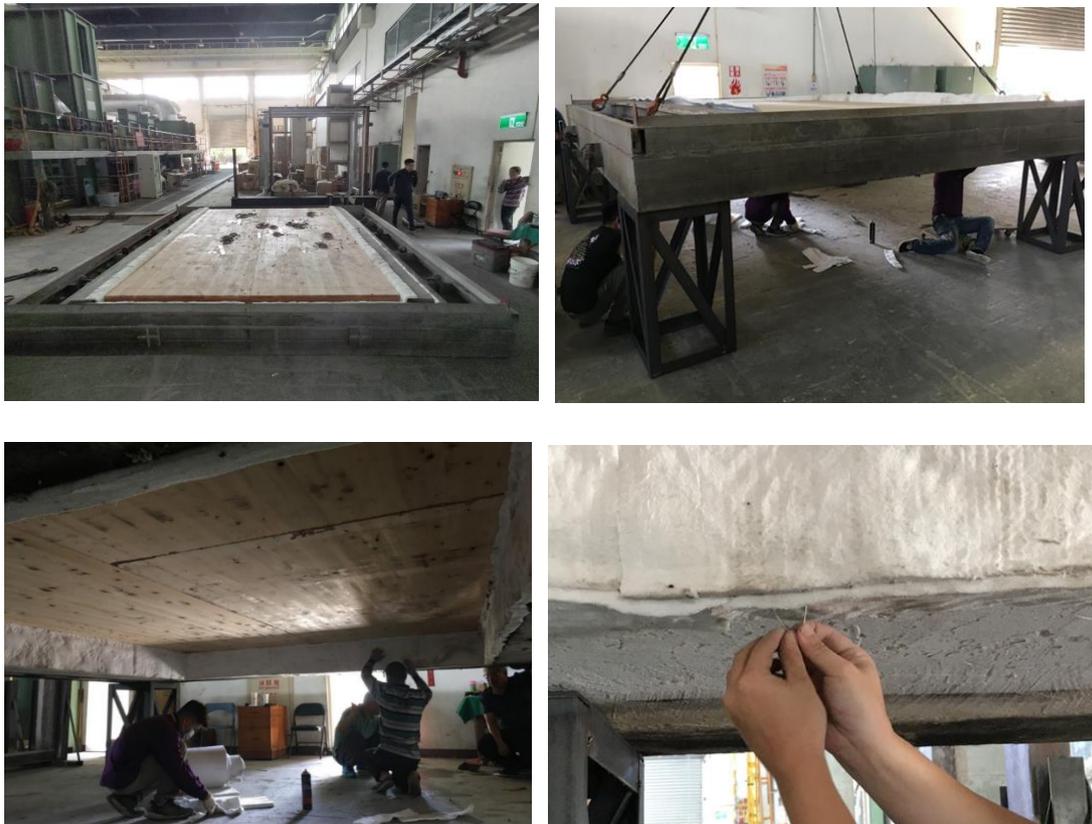


圖3-16 試體放入框架內並在邊框周圍塞入防火棉後架高佈置底部防火棉

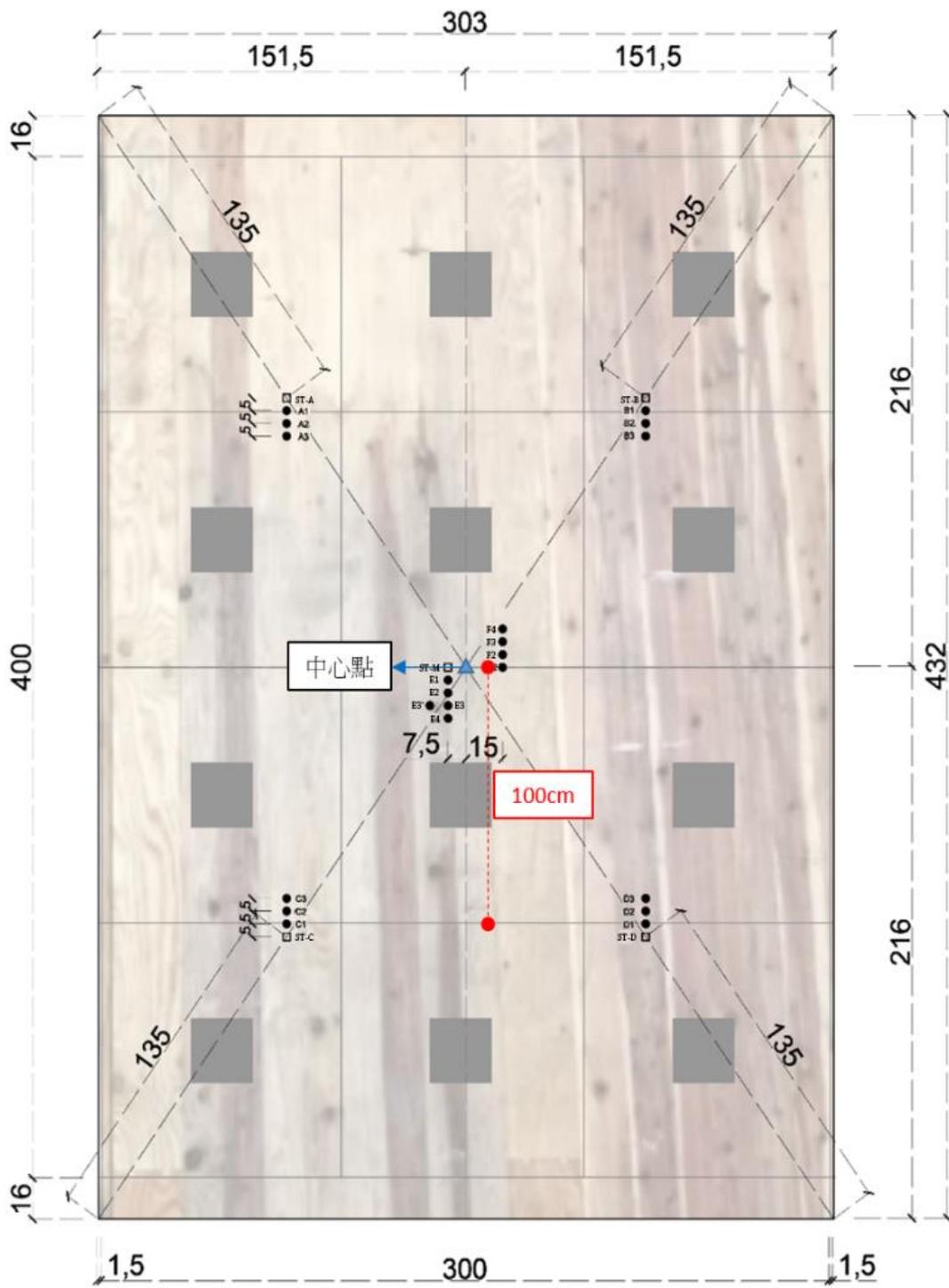


圖3-17 載重塊之配置及位移計之架設位置



圖3-18 測溫棒佈置



圖3-19 儀器設置完成



圖3-20 試體吊入爐內



圖3-21 設置載重塊



圖3-22 載重塊布置完成

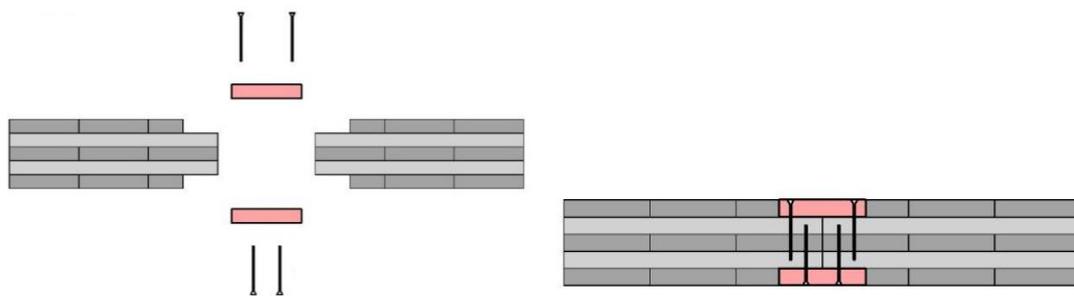


圖3-23 位移計架設完成

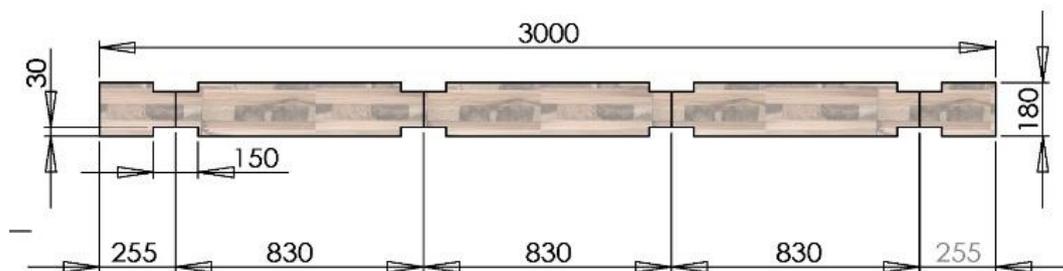
3.3.3 國產柳杉 CLT 牆板之組裝

國產柳杉承重牆板材尺寸約為 300*300cm(實際裁切誤差約 1cm)，柳杉集成元斷面尺寸約為 3.8 * 8.9 (cm)，集成元經過刨光膠合後之 CLT 板牆厚度約為 18cm，包覆試體板材之鐵框尺寸約為 430*426(cm)。

首先將五片 CLT 板材依序架高後，利用”Double Surface Splines”的接合方式，並且在板材正反面共 8 處之接合部上鋪上防火泥後，利用螺釘上下交錯方式，接合各片板材(接合部使用 0.8*9cm 六齒梅花螺栓)。最後將多餘的板材及凸出的填木裁切掉。整體拼接流程如圖 3-24~圖 3-26。

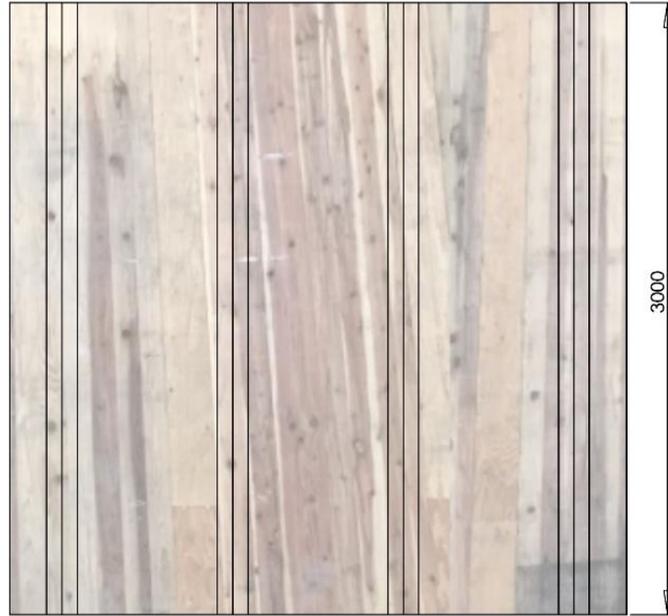


(a) Double Surface Splines

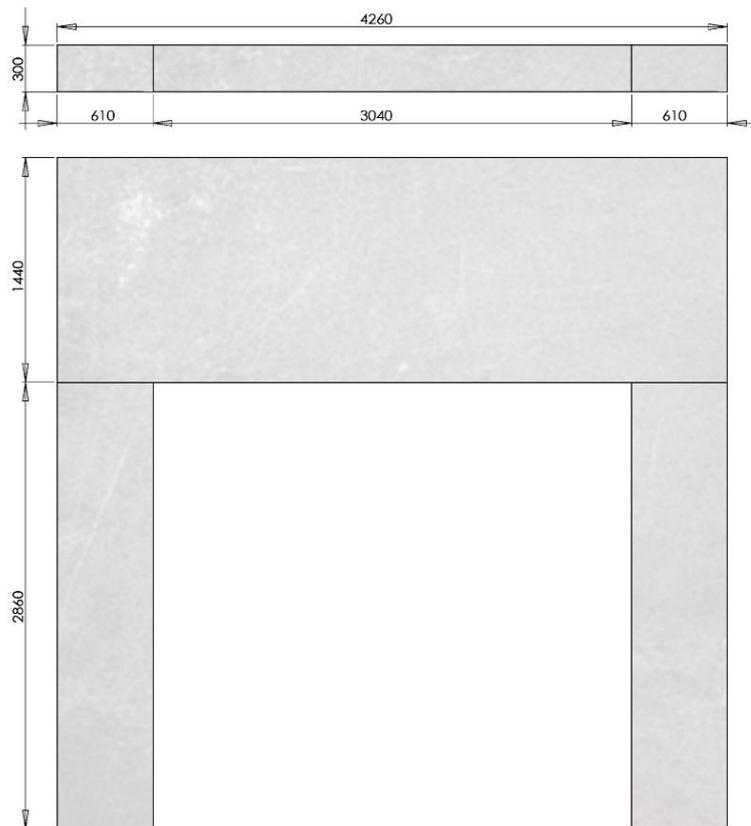


(b) 國產柳杉 CLT 拼接單元

圖3-24 國產柳杉 CLT 拼接方式及單元尺寸



(a) 國產柳杉 CLT 牆板之立面示意圖



(b) 框架尺寸圖示

圖3-25 國產柳杉 CLT 牆板立面示意圖及框架尺寸



(a) 國產柳杉 CLT 單元於現場擺設



(c) 利用螺絲進行拼接



(c) 拼接完成圖

圖3-26 國產柳杉 CLT 牆板之拼接

完成國產柳杉 CLT 牆板之單元拼接後，接著進行佈設測溫點、安裝測溫線及佈置試體防火棉等作業，測溫點之配置及防火棉之佈置作業如下流程。

(1) 佈設測溫點及安裝測溫線:

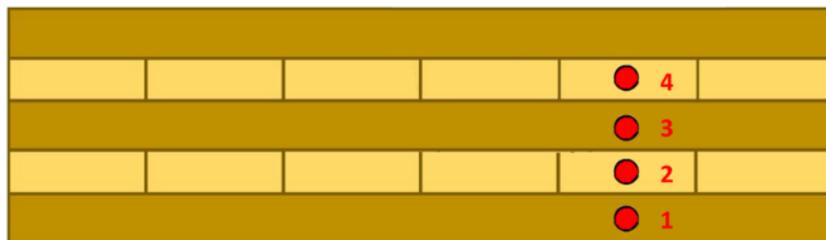
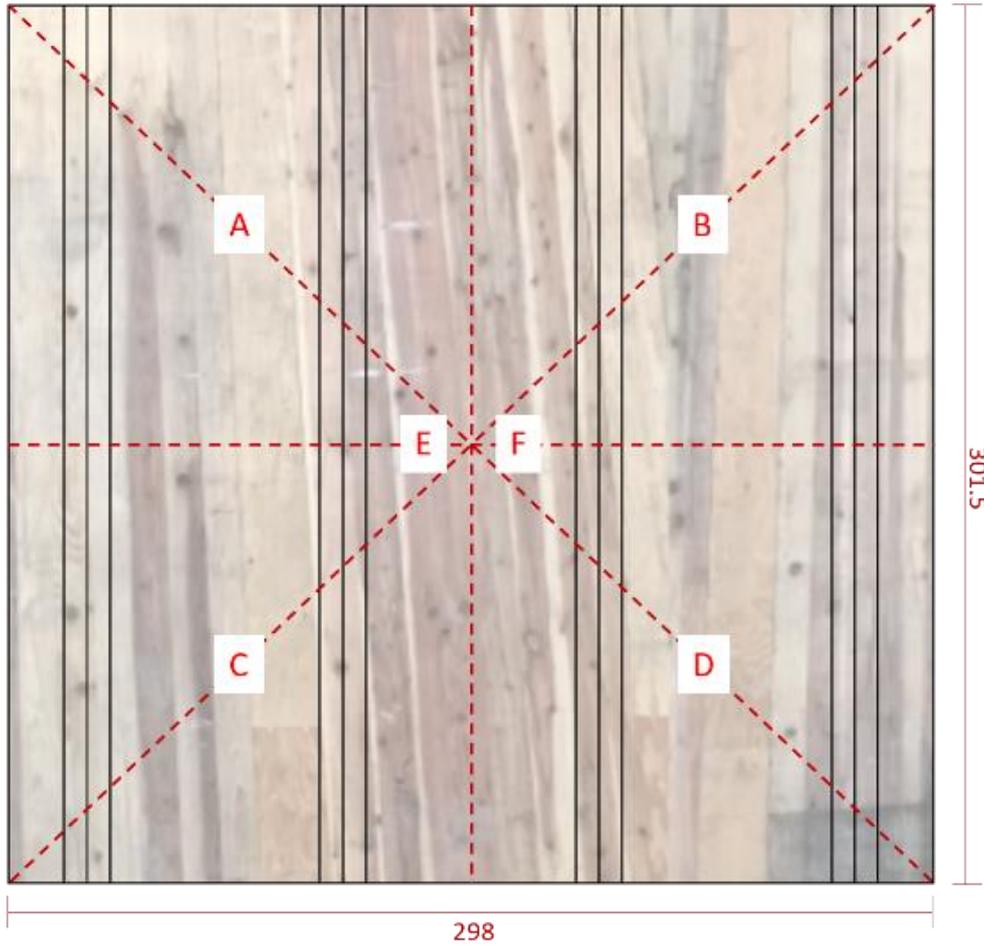
首先利用打線器標出板材之中心點，並且在四象限處分別標示 A、B、C、D 處，並在中心點之左右兩側設 E 及 F 處，且 A、B、C、D 處每往板中心處每 5 公分佈設一點側溫點，標示方法 a:ST:表溫層 b1:CLT 第 1 層(曝火層) c2: CLT 第 2 層 d 3:CLT 第 3 層；另外 E 及 F 處分別左右兩側 7.5 公分，且往板緣處延伸，每 5 公分佈設 1 測溫點，a1:CLT 第 1 層(曝火層) b2: CLT 第 2 層 c3:CLT 第 3 層 d4:CLT 第 4 層。

測表溫層之熱電偶，除了四象限內的 A、B、C 及 D 處各有一處(ST-A、ST-B、ST-C、ST-D)，中心點處則另設 ST-M，另外依照 CNS12514 之規定，在水平中心線，左緣處往中心線 10cm 設置 ST-1；由板材左方第二處接合部往左 10cm 及上緣 10cm 設置 ST-2；縱向中心水平線，距離上緣 10cm 設置 ST-3；最後在水平中心線，右緣處往中心線 10cm 設置 ST-4。

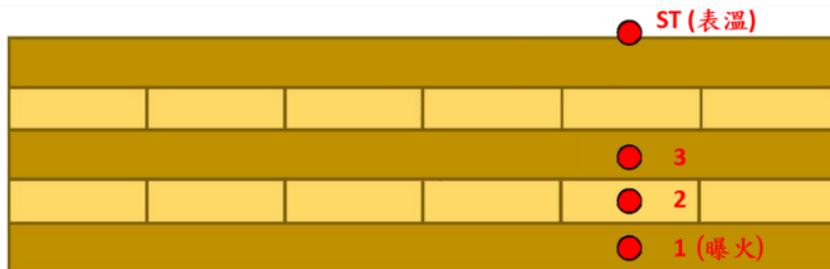
佈線方法主要為在鑽孔針上利用綁線的方式標示出鑽孔深度後，開始依層鑽孔，鑽孔後放入些許木屑，避免防火膠包覆測溫端部，造成量測阻礙，最後再灌入防火泥。



(a) 安裝完成之測溫點及試體相關位置



國產柳杉承重牆板之E、F處測溫線設置方式



國產柳杉承重牆板之A、B、C、D處測溫線設置方式

(b) 不同深度之測溫線埋設深度示意圖

圖3-27 測溫點規劃及各點位之測溫線埋設深度(單位:cm)

(2) 佈置試體防火棉:

測溫線埋設完成後，接著將 CLT 試體吊入試體框架內，為了避免實驗時火苗竄出，於佈置好的 CLT 試體框架及四周佈置防火棉，佈置圍成後吊掛進入實驗爐體框中。

(3) 佈設位移器、數據設定及加載:

將試體置入爐體後，將 29 條熱電偶插入儀器，並測試有無異常後，在試體下方設置垂直位移 S 及垂直位移 N，另外在水平方向設置自由端位移及水平位移，共 4 處位移，將所有熱電偶線接上儀器後，設置好電腦數據並測試無異後，在試驗開始前 15 分鐘持壓 24.35(噸)，10 分鐘持壓 24.46(噸)，並於 109 年 10 月 29 日 15 時 07 分 47 秒開始加火並試驗。

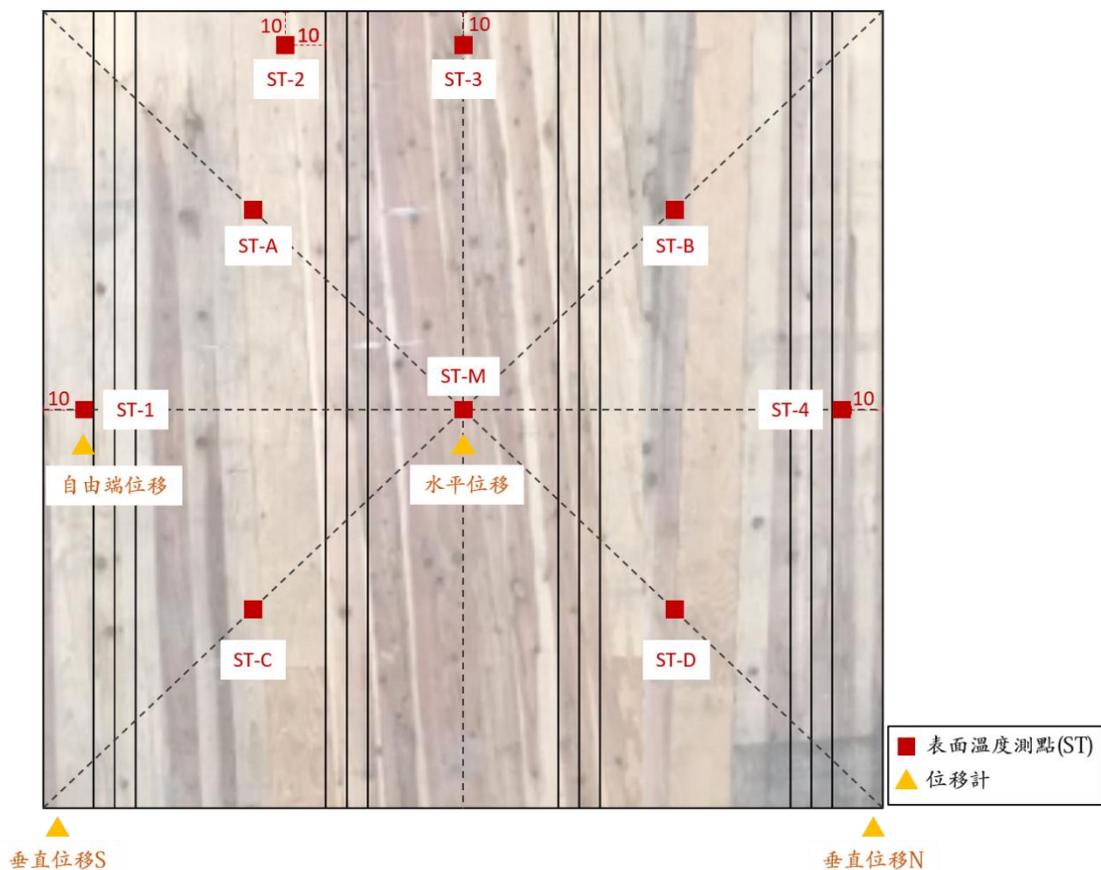


圖3-28 測表溫度線之電熱偶及位移計之架設位置



圖3-29 試體框架組立



圖3-30 於框架四周佈置防火棉



圖3-31 試體含框架於曝火面立面圖

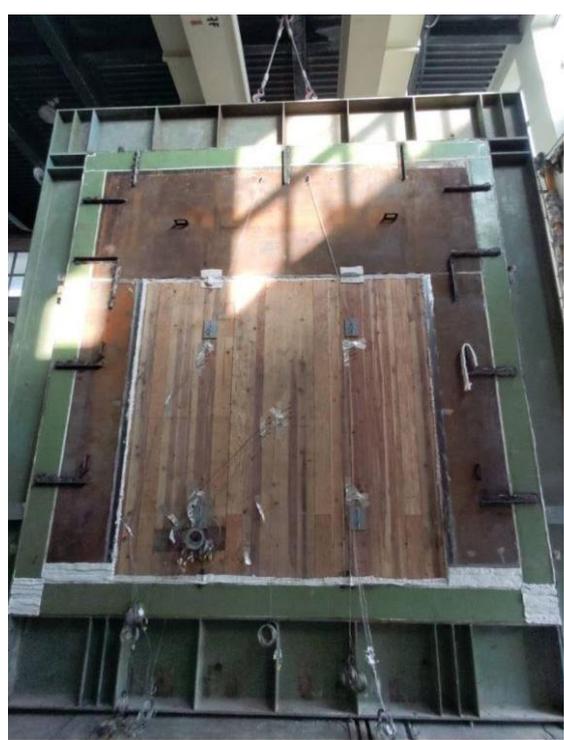


圖3-32 試體含框架於非曝火面立面圖



圖3-33 29 條熱電偶佈線完成



圖3-34 設置好 2 處垂直位移後，將黃色鐵架移動到試體前方，並開始設置另外 2 處之水平位移。



圖3-35 水平位移及自由端位移架設完成。



圖3-36 前置作業均完成後，開始加載重。

第四章 實驗結果及討論

第一節 日本扁柏 CLT 樓板

本實驗於內政部建築研究所防火實驗中心進行，實驗現場溫度為:29.7°C，濕度:69%。實驗試體觀測到的最大撓曲變形 26.7cm，換算可得其最大變形速率為 11.9mm/min。另外，試驗過程 2:40 秒時，觀測到中間孔隙開始冒煙，6:56 秒時煙集中在位移器 1 及位移器 2 之間，發煙主要集中在兩片 CLT 板續接之中央部。實驗進行到 23:23 秒試體火焰變大，27:06 秒爐內劇烈燃燒，35:57 秒爐內燃燒穩定。穩定燃燒至 54:33 秒時另外產生一次劇烈的燃燒。實驗試體在完成後，送至工廠存放，並進行炭化層之清除確認炭化深度及炭化速率。本節針對日本扁柏 CLT 樓板之實驗結果進行分析及討論。

4.1.1 炭化速率評估

本研究採用 ISO 834-1 之加熱溫度曲線，圖 4-1 為標準加熱溫度曲線與實驗加溫曲線之比較，實驗加溫曲線大致符合標準加熱曲線，僅在 2-5 分鐘以及第 55

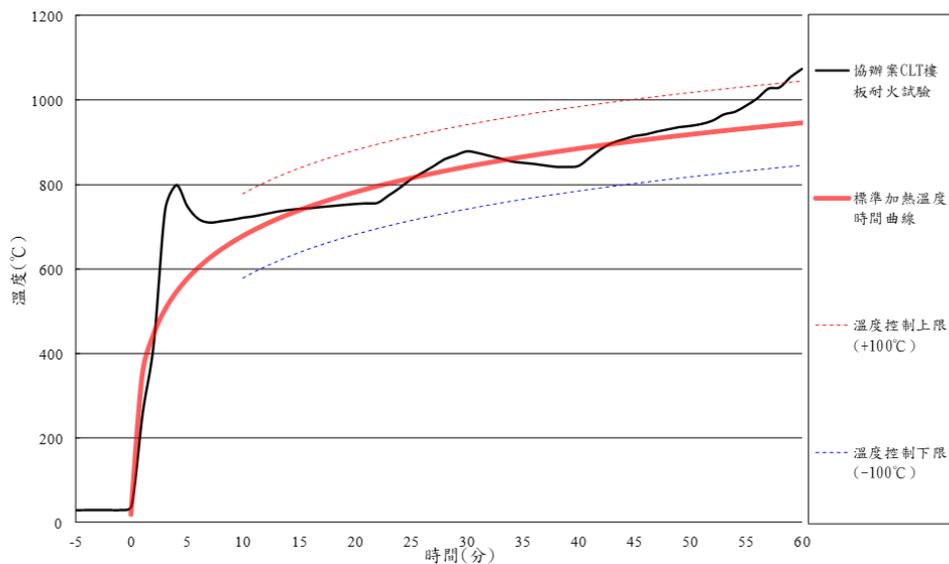
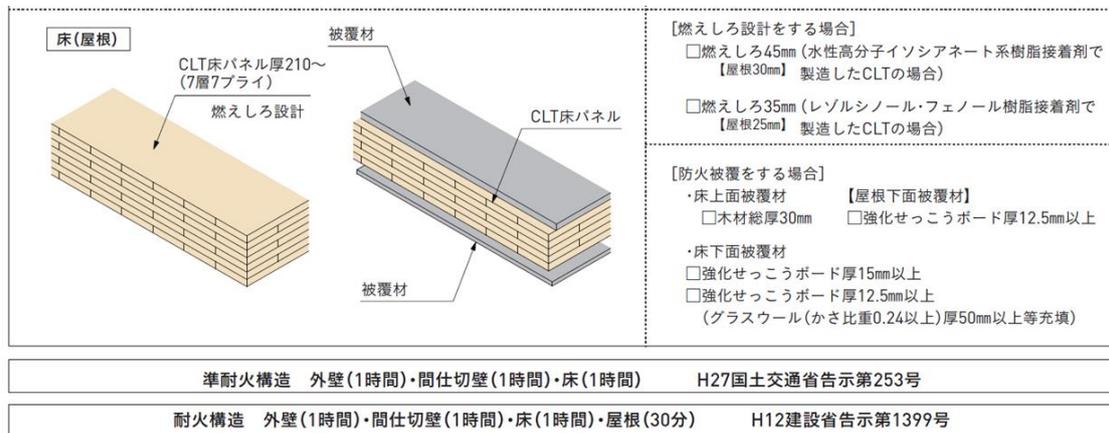


圖4-1 標準加熱溫度曲線與日本扁柏實驗加溫曲線之比較

分鐘後，實驗加溫曲線高於溫度控制的上限值。由前述實驗記錄可知，在接近3分鐘時可以從 CLT 板之中央拼接縫觀察到冒煙，亦與此時加溫較快有一定關連性。根據日本國土交通省公告之 CLT 炭化層設計(圖 4-2)，CLT 樓板(屋頂)在 1 小時之炭化層產生速率，若使用水溶性樹脂(PU)，則炭化層產生速率約介於 0.7~0.8mm/min 之間，若使用耐燃性較佳之間苯二酚-甲醛樹脂(RF)，則炭化層產生速率約介於 0.6~0.7mm/min 之間。因此，本研究以 0.7mm/min 之炭化速率，首先推估曝火面最底層完全燒盡之時間約介於 42.5 分鐘之間，而 1 小時之炭化層深度約為 4.2cm 左右。亦即 E2 測溫點(曝火面第 1 層)約在 21 分鐘左右會開始偵測到火爐溫度，E3 測溫點(曝火面第 2 層)則不太有明顯的升溫現象。



※上記2仕様(1時間準耐火構造、1時間耐火構造)についてもCLTで設計可能です。該当する告示を参照してください。

圖4-2 日本國土交通省公告之 CLT 炭化層設計

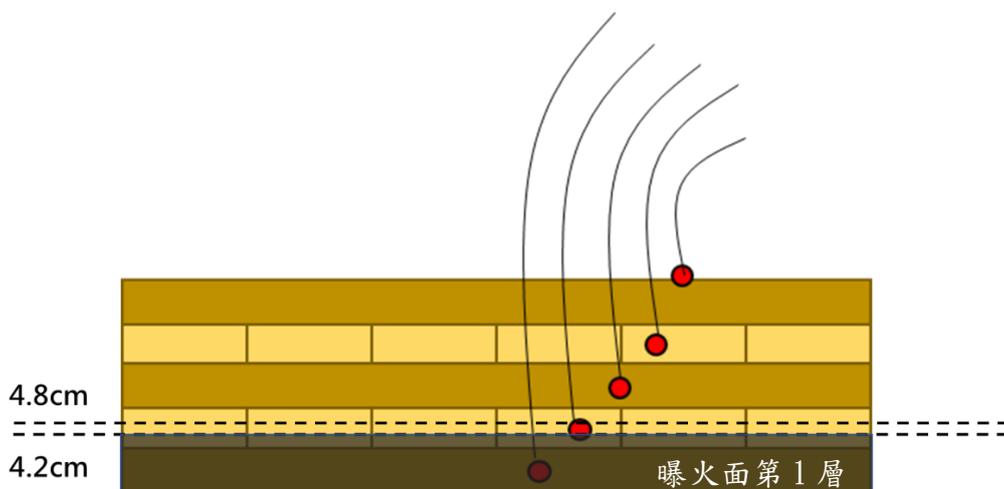


圖4-3 炭化深度之預估

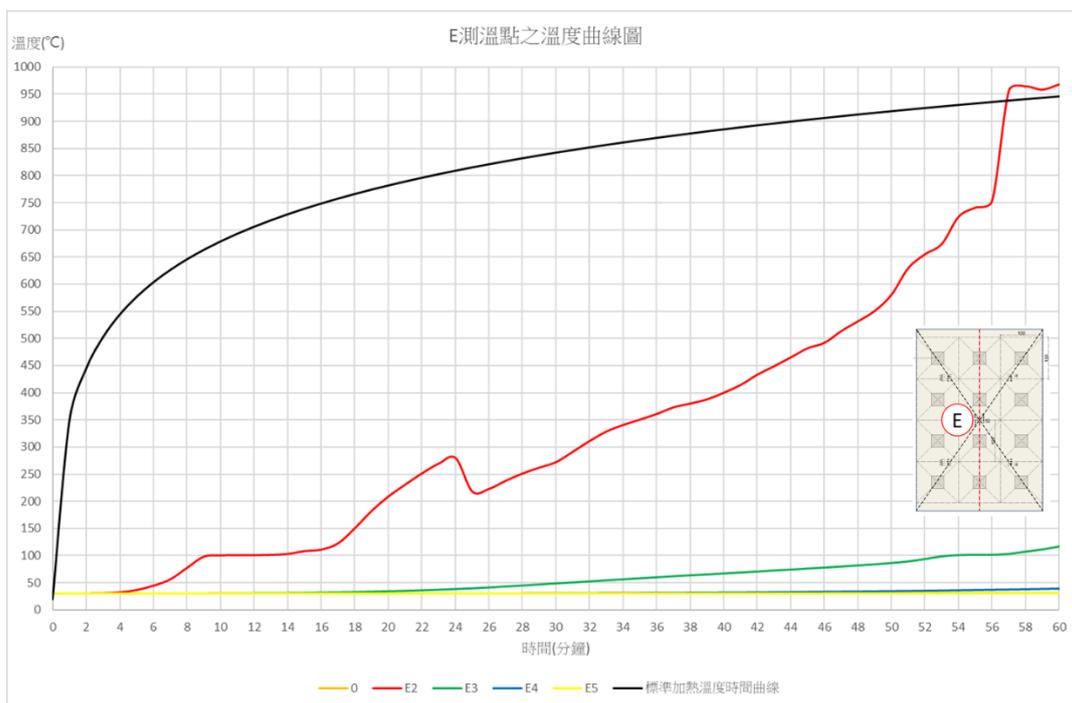


圖4-4 測溫點 E 點:不同深度測溫計之升溫曲線

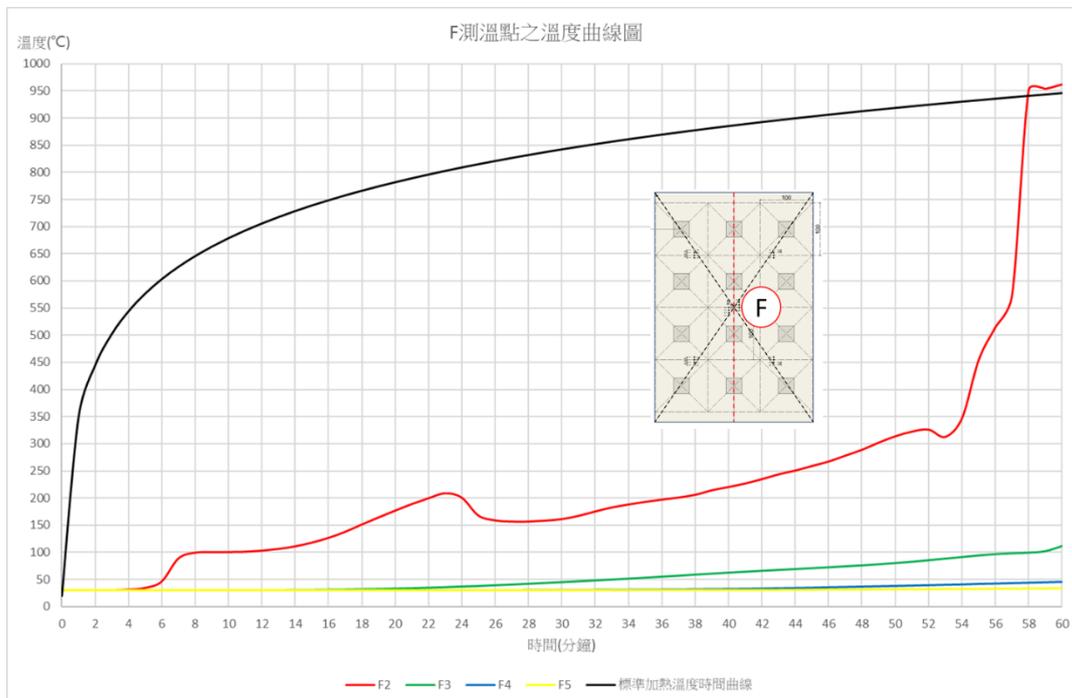


圖4-5 測溫點 F 點:不同深度測溫計之升溫曲線

由測溫點 E 點在不同深度測溫計之升溫曲線(圖 4-4)中可發現，E2 點(曝火面第 1 層)大約在 18 分鐘左右有較明顯的升溫趨勢，顯示此時測溫計已經受到火爐溫度之影響，由於火爐加溫在第 2-5 分鐘間有較標準曲線為大之趨勢，因此 E2 點較炭化速率預估之 21 分鐘達到 E2 測溫點為快，屬於合理範圍。E3 點之升溫曲線則無太明顯之升高趨勢，顯示炭化深度約為 4.5cm，亦屬合理範圍。同樣的升溫趨勢，亦可在測溫點 F 中(圖 4-5)，不同深度測溫計之升溫曲線觀察到相仿之升溫趨勢，顯示本實驗之炭化層生成速率符合本研究期待。後續章節將針對實驗後試體進行炭化層清除，量測較為精準之炭化深度，並提出合理的炭化速率進行說明。另外，由圖 4-6 之撓曲變形曲線中可發現，大約在 42.5 分鐘時，樓板之撓曲變形有突然增大的情形發生。此現象可研判應為最底層(曝火面第 1 層)沿纖維方向之強軸集成元燒盡後，曝火面第 2 層由於為弱軸，因此可提供的抗彎強度有限所造成。也由於此弱軸(曝火面第 2 層)並不提供抗彎強度，僅做為防火層使用，因此亦可觀察到 42 分鐘後樓板的撓曲變形呈現變化不大的趨勢。

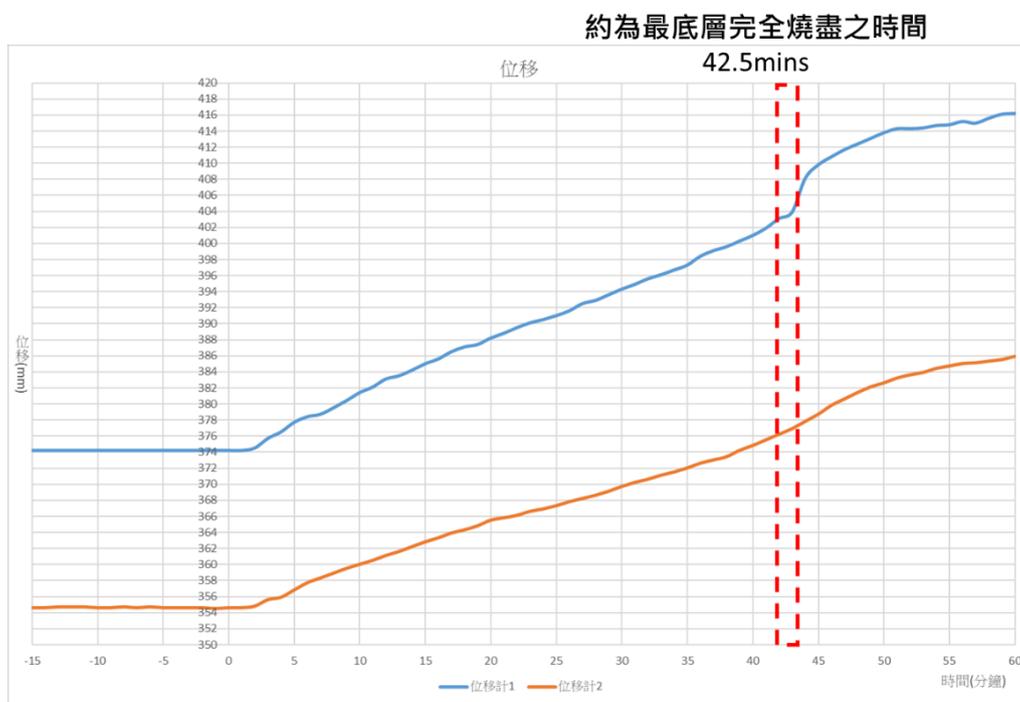


圖4-6 位移計 1 及 2 所量測之撓曲變形

4.1.2 炭化深度之量測

本次進行炭化測量之試體，為於 5 月 29 日完成火害實驗之日本扁柏 CLT 樓板 (5 層共 15cm)。其炭化層之量測及佈設規劃，主要透過將既有板片切割成寬 30cm 左右的大小，再將此切割後之單元每 30cm 左右進行一次炭化深度量測。由於樓板尺寸為 440cm*303cm，取中心線位置(151.5cm 處)標註 R1，分別在左右兩側每 30cm 設一裁切點，因此共有 9 處斷面(如圖 4-7)。每條長向單元斷面以 30cm 為間隔進行測量，每一單元共計 14 個量測點位。(30cm、60cm、90cm、120cm、150cm、180cm、210cm、240cm、270cm、300cm、330cm、360cm、390cm 及 420cm) (圖 4-8)

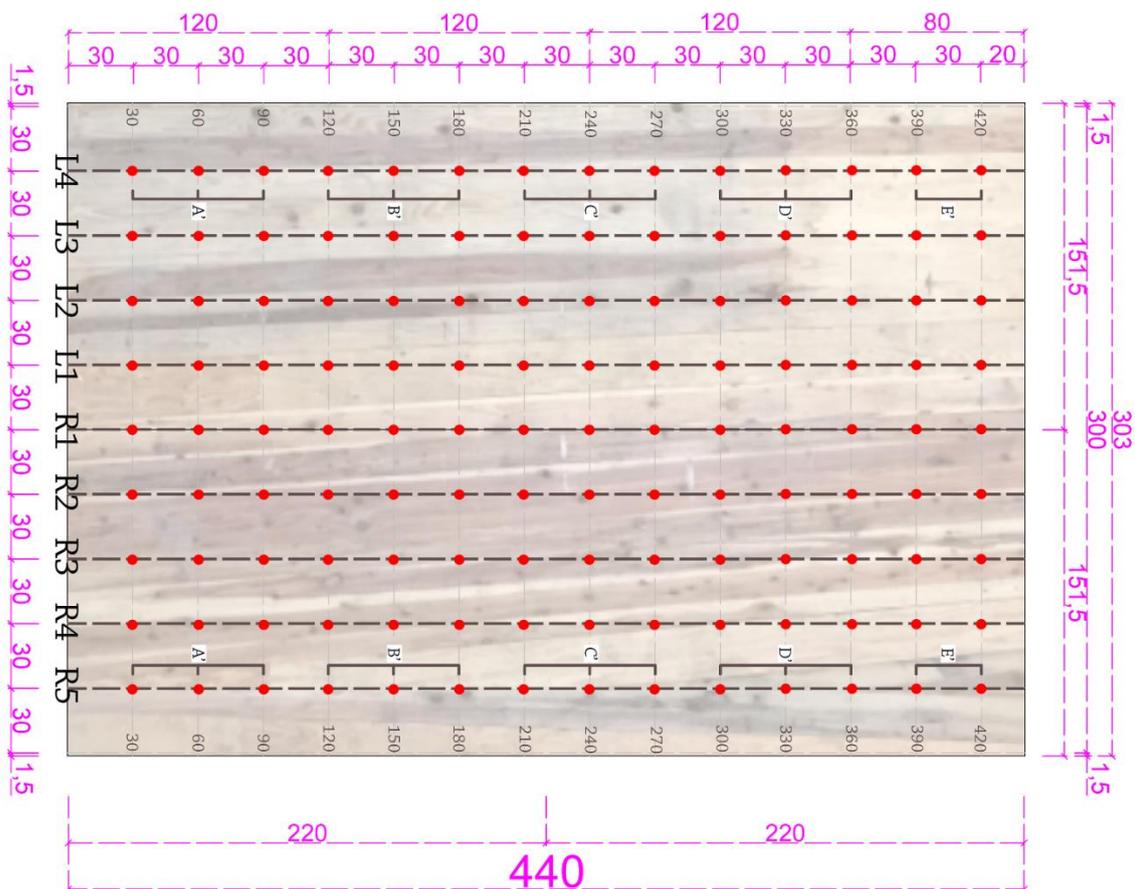


圖4-7 實驗試體每 30cm 分割成一個單元

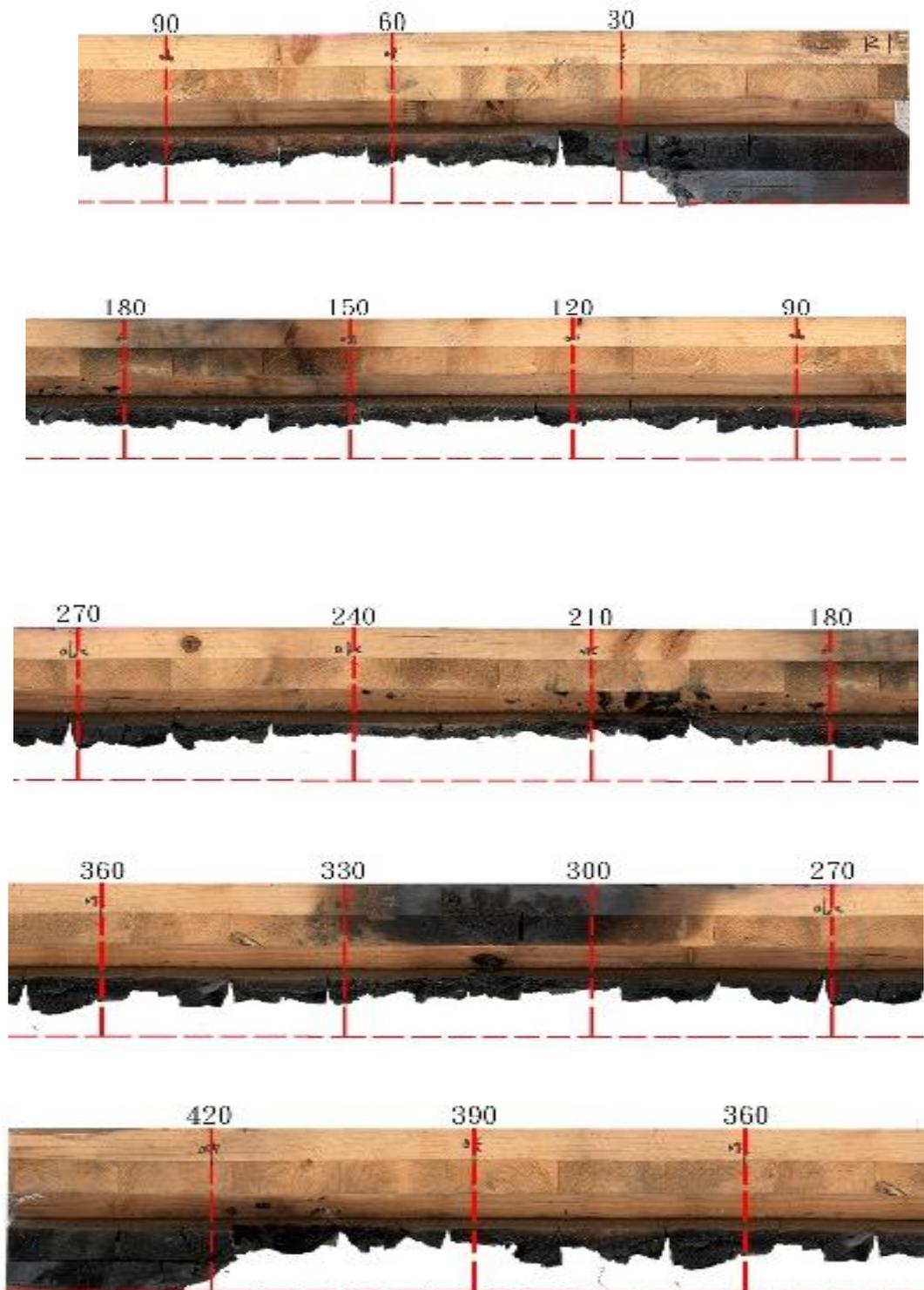


圖4-8 單元斷面以 30cm 為間隔之量測點位

主要量測方式為在各量測點位上先標記出熱解層基線及炭化層基線。接著，將熱解層基線設為 T 點，碳化層基線設為 D 點(圖 4-10)，分別量測由非曝火面開始至 T 及 D 點之距離。



圖4-9 試體分割流程

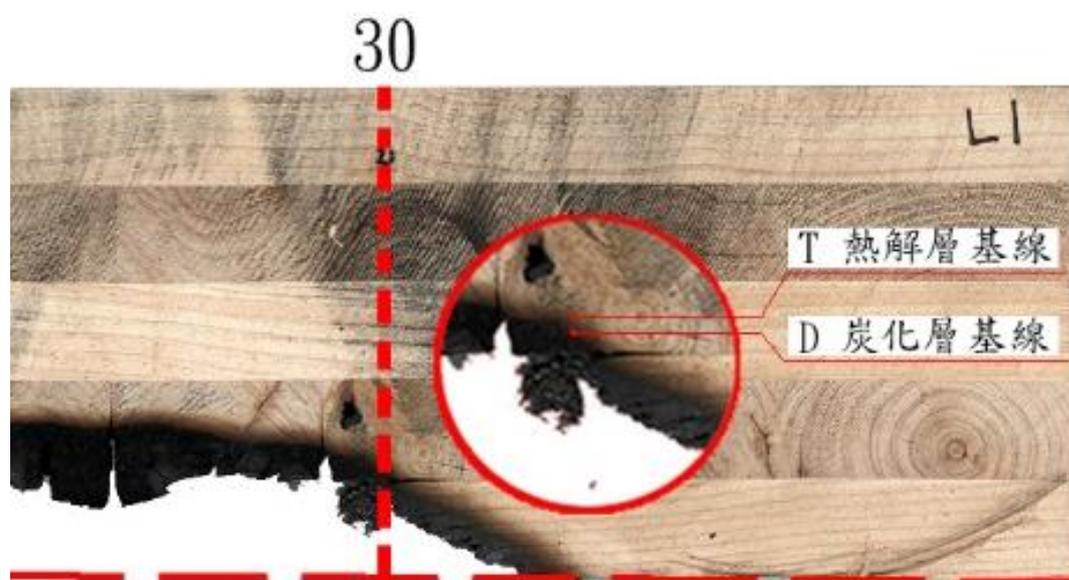


圖4-10 熱解層基線 T 點及碳化層基線 D 點

根據歐洲規範 EN1995-1-2 之規定，木構件於火害後之承載力有兩種計算方式，分別是強度折減法及殘餘截面法。殘餘截面法由 Schaffer 提出，主要應用對象為膠合梁在火害後的行為。其理論也透過大量實驗進行驗證並推廣。殘餘截面法指出木材在高溫下會產生炭化層，此炭化層並無強度。然而，在炭化層的內側會產生高溫受熱層，稱為熱解層。為了考慮此熱解層因受高溫的強度折減，此層在 EN1995-1-2 中稱為等效炭化層，亦即視其為零強度層，取零強度厚度為 7mm。北美 CLT Handbook 亦提到此熱解層的深度估算可以炭化層深度的 20% 進行估算，以北美常用樹種之 1 小時的炭化深度為約為 1.5in(38mm) 預估，其熱解層深度約為 0.3in(0.76mm)，與 EN1995-1-2 之數值相近。

各別切割後之 CLT 單元在間距 30cm 之炭化深度量測結果整理如表 4-1 及圖 4-11。其中，在 210cm-270cm 間有最大深度為 7.1cm 的炭化層產生，此最大炭化深度發生在兩塊 CLT 板之搭接處，判斷由於搭接處並無法如同板本身緊密接合，因此會有火源竄入並造成炭化層較其他區域為大之情形。此部分之平均炭化速率為 1.18mm/min，高於文獻值(界於 0.6mm-1.0mm 間)。其他非搭接部分的炭化深度約介於 4.4cm~5.1cm 左右，平均炭化速率介 0.73~0.84mm/min。略高於日本國土交通省建議的炭化速率值(制式工法建議炭化深度值為 4.5cm)。

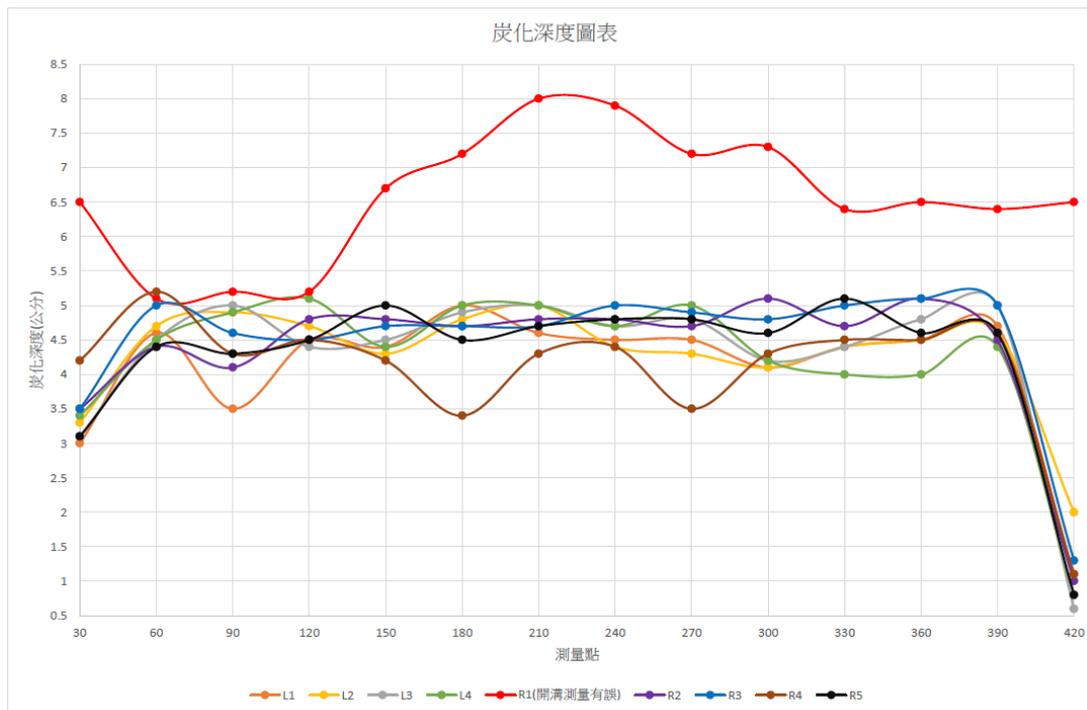


圖4-11 炭化深度量測結果

表4-1 日本扁柏 CLT 炭化深度量測結果

		日本扁柏標板之炭化層實驗(公分)																	
		T: 炭化層深度(D); 炭化層深度																	
		L1	L1'	L2	L2'	L3	L3'	L4	L4'	R1	R1'	R2	R2'	R3	R3'	R4	R4'	R5	R5'
30	T	0.3		0.5		0.3		0.6		0.2		0.5		0.4		0.3		0.6	
	D	3		3.3		3.1		3.4		6.5		3.5		3.5		4.2		3.1	
60	T	0.4	L1A'	0.3	L2A'	0.3	L3A'	0.4	L4A'	0.3	R1A'	0.5	R2A'	0.2	R3A'	0.6	R4A'	0.4	R5A'
	D	4.6	3.7	4.7	4.3	4.5	4.2	4.5	4.4	5.1	5.6	4.4	4.4	5	5.2	4.4	4.6	4.4	3.9
90	T	0.7		0.5		0.4		0.3		0.3		0.4		0.6		0.3		0.3	
	D	3.5		4.9		5		4.9		5.2		4.1		4.6		4.3		4.3	
120	T	0.5		0.2		0.3		0.4		0.3		0.3		0.2		0.3		0.4	
	D	4.5		4.7		4.4		5.1		5.2		4.8		4.5		4.5		4.5	
150	T	0.3	L1B'	0.3	L2B'	0.4	L3B'	0.5	L4B'	0.1	R1B'	0.1	R2B'	0.3	R3B'	0.3	R4B'	0.3	R5B'
	D	4.4	4.6	4.3	4.6	4.5	4.6	4.4	4.4	6.7	6.4	4.8	4.8	4.7	4.2	4.2	4.0	5	4.7
180	T	0.3		0.4		0.4		0.4		0.1		0.3		0.7		0.6		0.4	
	D	5		4.8		4.9		5		7.2		4.7		4.7		3.4		4.5	
210	T	0.4		0.4		0.3		0.4		0.1		0.4		0.5		0.2		0.3	
	D	4.6		5		5		5		8		4.8		4.7		4.3		4.7	
240	T	0.3	L1C'	0.5	L2C'	0.5	L3C'	0.3	L4C'	0.1	R1C'	0.3	R2C'	0.5	R3C'	0.3	R4C'	0.4	R5C'
	D	4.5	4.5	4.4	4.567	4.7	4.8	4.7	4.7	7.9	7.7	4.8	4.8	5	4.4	4.1	4.8	4.8	4.8
270	T	0.3		0.4		0.3		0.4		0.3		0.2		0.5		0.4		0.5	
	D	4.5		4.3		4.8		5		7.2		4.7		4.9		3.5		4.8	
300	T	0.4		0.5		0.5		0.3		0.2		0.3		0.3		0.5		0.3	
	D	4.1		4.1		4.2		4.2		7.3		5.1		4.8		4.3		4.6	
330	T	0.2	L1D'	0.5	L2D'	0.4	L3D'	0.4	L4D'	0.3	R1D'	0.6	R2D'	0.6	R3D'	0.3	R4D'	0.3	R5D'
	D	4.4	4.3	4.4	4.3	4.4	4.5	4	4	6.4	6.7	4.7	5.0	5	4.5	4.4	5.1	4.8	
360	T	0.4		0.5		0.6		0.6		0.3		0.4		0.3		0.4		0.4	
	D	4.5		4.5		4.8		4		6.5		5.1		5.1		4.5		4.6	
390	T	0.4		0.4		0.5		0.4		0.3		0.5		0.2		0.3		0.2	
	D	4.7		4.6		5		4.4		6.4		4.5		5		4.6		4.6	
420	T	0.9	L1E'	0.4	L2E'	0.6	L3E'	0.5	L4E'	0.4	R1E'	0.6	R2E'	0.9	R3E'	0.8	R4E'	0.6	R5E'
	D	1.1	2.9	0.4	3.3	0.6	2.8	0.5	0.8	0.4	6.5	0.6	2.8	1.3	0.8	1.1	3	0.6	2.7

4.1.3 火害後之殘餘樓板斷面等值 EI 評估

本研究之日本扁柏 CLT 樓板在經過 1 小時火害實驗後，可透過炭化深度的量測得到其碳化速率約為 0.7mm/min，本評估即以此數據進行計算。

- (1) 當試體尚未進行燃燒時，斷面如圖 4-12 示。其評估計算結果可整理成如下表 4-2 所示。

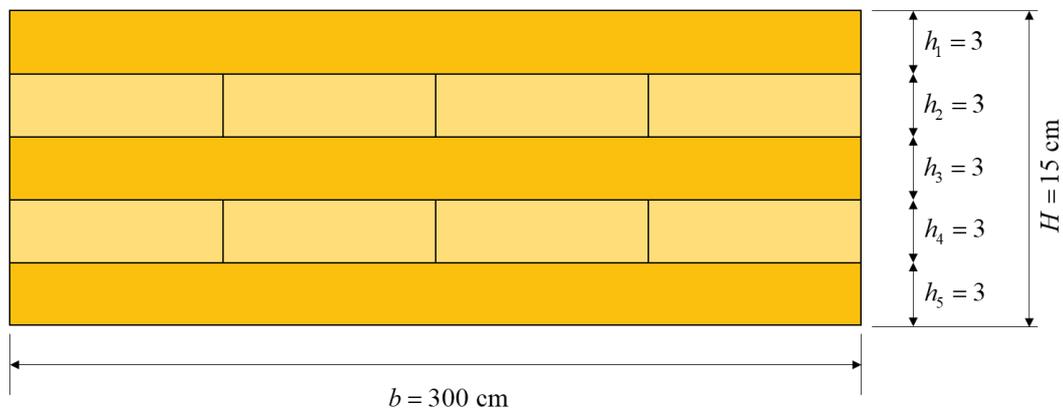


圖4-12 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒前示意圖

- 碳化深度:0 (cm)

$$E_i: E_1 = E_3 = E_5 = 8.7 \text{ (Gpa)} = 8.87 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{、} E_2 = E_4 = 0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$y_i: y_1 = 1.5 \text{ (cm)} \text{、} y_2 = 4.5 \text{ (cm)} \text{、} y_3 = 7.5 \text{ (cm)} \text{、} y_4 = 10.5 \text{ (cm)} \text{、} y_5 = 13.5 \text{ (cm)}$$

$$h_i: h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = 3 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 y_i h_i E_i &= 1.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 + 4.5 \times 3 \times 0 + 7.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 \\ &\quad + 10.5 \times 3 \times 0 + 13.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 \\ &= 5987250 \text{ (cm}^6\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 h_i E_i &= 3 \times 8.87 \times 10^4 + 3 \times 0 + 3 \times 8.87 \times 10^4 \\ &\quad + 3 \times 0 + 3 \times 8.87 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$= 798300 \text{ (cm}^5\text{)}$$

■ 中立軸: $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^5 y_i h_i E_i}{\sum_{i=1}^5 h_i E_i} = \frac{5987250}{798300} = 7.5 \text{ (cm)}$

$$d_i = y_i - \bar{y}: d_1 = 1.5 - 7.5 = -6 \text{ (cm)}、d_2 = 4.5 - 7.5 = -3 \text{ (cm)}、d_3 = 7.5 - 7.5 = 0 \text{ (cm)}、$$

$$d_4 = 10.5 - 7.5 = 3 \text{ (cm)}、d_5 = 13.5 - 7.5 = 6 \text{ (cm)}$$

$$\sum_{i=1}^5 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i = \frac{1}{12} (300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3^3 \times 0 + 300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3^3 \times 0 + 300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4)$$

$$= 179617500 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

$$\sum_{i=1}^5 b_i h_i d_i^2 E_i = 300 \times 3 \times (-6)^2 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3 \times (-3)^2 \times 0 + 300 \times 3 \times 0^2 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3 \times (3)^2 \times 0 + 300 \times 3 \times (6)^2 \times 8.87 \times 10^4$$

$$= 5747760000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^5 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_{i=1}^5 b_i h_i d_i^2 E_i = 179617500 + 5747760000 = 5.93 \times 10^9 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

表4-2 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒前 EI_{eff} 計算表

層	E_i ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	b_i (cm)	碳化 深度 (cm)	h_i (cm)	A_i (cm^2)	y_i (cm)	\bar{y} (cm)	d_i (cm)	$E_i I_i$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	$E_i A_i d_i^2$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{eff} ($10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)
5	8.87	300	0	3	900	1.5	7.5	-6	5987.25	287388	5.93
4	0	300	0	3	900	4.5		-3	0	0	
3	8.87	300	0	3	900	7.5		0	5987.25	0	
2	0	300	0	3	900	10.5		3	0	0	

1	8.87	300	0	3	900	13.5		6	5987.25	287388	
---	------	-----	---	---	-----	------	--	---	---------	--------	--

(2) 當試體曝火面第 1 層完全碳化，其斷面如圖 4-13 示。其評估計算結果可整理成如下表 4-3 所示。

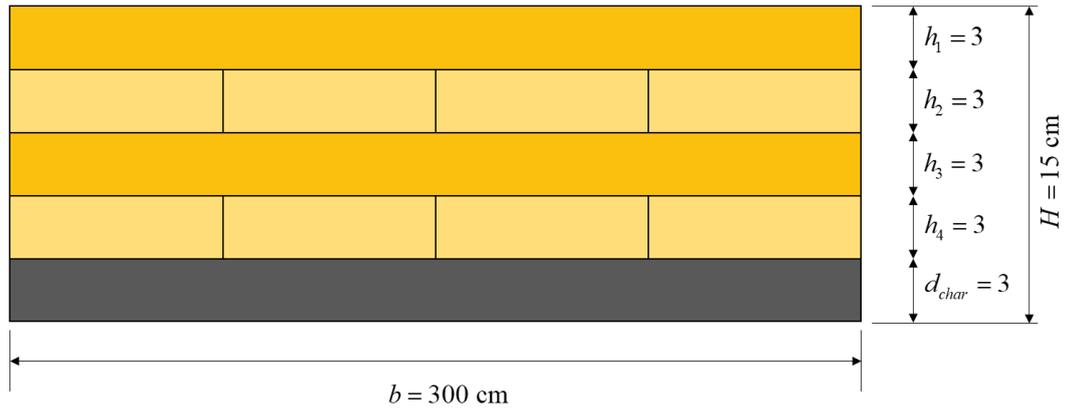


圖4-13 日本扁柏 CLT 樓板試體第 5 層完全碳化示意圖

■ 碳化深度:3 (cm)

$$E_i: E_1 = E_3 = 8.7 \text{ (Gpa)} = 8.87 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}、E_2 = E_4 = E_5 = 0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$y_i: y_1 = 1.5 \text{ (cm)}、y_2 = 4.5 \text{ (cm)}、y_3 = 7.5 \text{ (cm)}、y_4 = 10.5 \text{ (cm)}$$

$$h_i: h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 3 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i &= 1.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 + 4.5 \times 3 \times 0 + 7.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 + 10.5 \times 3 \times 0 \\ &= 2394900 \text{ (cm}^6\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 h_i E_i &= 3 \times 8.87 \times 10^4 + 3 \times 0 + 3 \times 8.87 \times 10^4 + 3 \times 0 \\ &= 532200 \text{ (cm}^5\text{)} \end{aligned}$$

■ 中立軸: $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i}{\sum_{i=1}^4 h_i E_i} = \frac{2394900}{532200} = 4.5 \text{ (cm)}$

$d_i = y_i - \bar{y}$: $d_1 = 1.5 - 4.5 = -3 \text{ (cm)}$ 、 $d_2 = 4.5 - 4.5 = 0 \text{ (cm)}$ 、 $d_3 = 7.5 - 4.5 = 3 \text{ (cm)}$ 、

$d_4 = 10.5 - 4.5 = 6 \text{ (cm)}$

$\sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i = \frac{1}{12} (300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3^3 \times 0 + 300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3^3 \times 0)$
 $= 119745000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2)$

$\sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 300 \times 3 \times (-3)^2 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3 \times (0)^2 \times 0 + 300 \times 3 \times 3^2 \times 8.87 \times 10^4$
 $+ 300 \times 3 \times (6)^2 \times 0$
 $= 1436940000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2)$

$EI_{eff} = \sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 119745000 + 1436940000 = 1.56 \times 10^9 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2)$

表4-3 日本扁柏 CLT 樓板試體第 1 層完全碳化 EI_{eff} 計算表

層	E_i ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	b_i (cm)	碳化 深度 (cm)	h_i (cm)	A_i (cm^2)	y_i (cm)	\bar{y} (cm)	d_i (cm)	$E_i I_i$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	$E_i A_i d_i^2$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{eff} ($10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)
5	8.87	300	0	3	900	1.5	4.5	-3	5987.25	71847	1.56
4	0	300	0	3	900	4.5		0	0	0	
3	8.87	300	0	3	900	7.5		3	5987.25	71847	
2	0	300	0	3	900	10.5		6	0	0	
1	0	300	3	0							

(3) 當試體燃燒 60 分鐘，其斷面如圖 4-14。其評估計算結果可整理成如下表 4-4 所示。

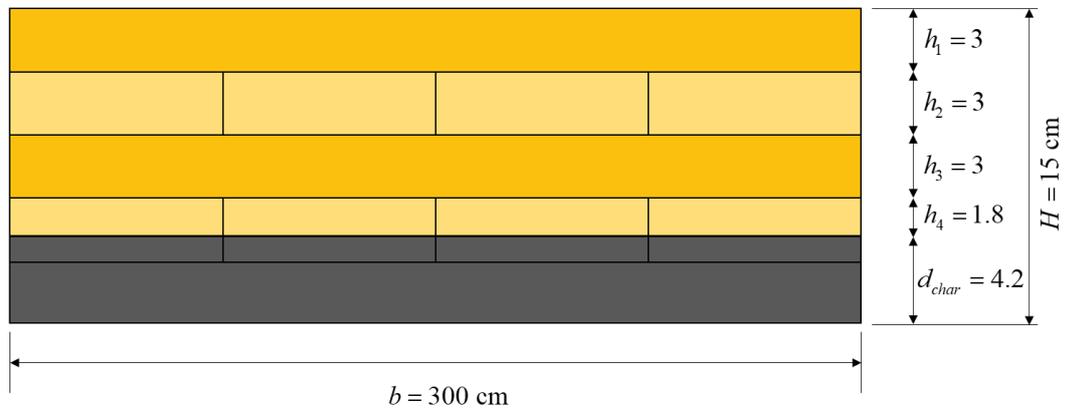


圖4-14 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘示意圖

■ 碳化深度: $d_{char} = 0.07 \times 60 = 4.2$ (cm)

$$E_i : E_1 = E_3 = 8.7 \text{ (Gpa)} = 8.87 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{、} E_2 = E_4 = E_5 = 0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$y_i : y_1 = 1.5 \text{ (cm)} \text{、} y_2 = 4.5 \text{ (cm)} \text{、} y_3 = 7.5 \text{ (cm)} \text{、} y_4 = 9.9 \text{ (cm)}$$

$$h_i : h_1 = h_2 = h_3 = 3 \text{ (cm)} \text{、} h_4 = 1.8 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i &= 1.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 + 4.5 \times 3 \times 0 + 7.5 \times 3 \times 8.87 \times 10^4 + 9.9 \times 1.8 \times 0 \\ &= 2394900 \text{ (cm}^6\text{)} \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^4 h_i E_i = 3 \times 8.87 \times 10^4 + 3 \times 0 + 3 \times 8.87 \times 10^4 + 1.8 \times 0$$

$$= 532200 \text{ (cm}^5\text{)}$$

■ 中立軸: $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i}{\sum_{i=1}^4 h_i E_i} = \frac{2394900}{532200} = 4.5 \text{ (cm)}$

$$d_i = y_i - \bar{y}: d_1 = 1.5 - 4.5 = -3 \text{ (cm)}、d_2 = 4.5 - 4.5 = 0 \text{ (cm)}、d_3 = 7.5 - 4.5 = 3 \text{ (cm)}、$$

$$d_4 = 9.9 - 4.5 = 5.4 \text{ (cm)}$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i = \frac{1}{12} (300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3^3 \times 0 + 300 \times 3^3 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 1.8^3 \times 0)$$

$$= 119745000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

$$\sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 300 \times 3 \times (-3)^2 \times 8.87 \times 10^4 + 300 \times 3 \times (0)^2 \times 0 + 300 \times 3 \times 3^2 \times 8.87 \times 10^4$$

$$+ 300 \times 1.8 \times (5.4)^2 \times 0$$

$$= 1436940000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 119745000 + 1436940000 = 1.56 \times 10^9 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

表4-4 日本扁柏 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘 EI_{eff} 計算表

層	E_i ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	b_i (cm)	碳化 深度 (cm)	h_i (cm)	A_i (cm^2)	y_i (cm)	\bar{y} (cm)	d_i (cm)	$E_i I_i$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	$E_i A_i d_i^2$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{eff} ($10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)
5	8.87	300	0	3	900	1.5	4.5	-3	5987.25	71847	1.56
4	0	300	0	3	900	4.5		0	0	0	

3	8.87	300	0	3	900	7.5		3	5987.25	71847	
2	0	300	1.2	1.8	540	9.9		5.4	0	0	
1	0	300	3	0							

第二節 北美花旗松 CLT 樓板

本實驗於內政部建築研究所防火實驗中心進行，試驗現場溫度為 30.8°C，濕度為 54%，試體在實驗完成後之最大撓曲變形為 22.9mm，可換算得到變形速率為 10.1mm/min。實驗開始為 109 年 10 月 13 日上午 11 時 04 分 09 秒，約進行到 3 分 24 秒時，觀測到拼接處開始大量冒煙，10 分 28 秒左右爐內呈現劇烈燃燒，32 分左右試體四個角落及拼接處開始大量冒煙，由試體之撓曲變形產生突然加大的現象判斷，曝火面第 1 層於 50-55 分左右完全炭化，實驗最後之 59-60 分間觀察到拼接處有火源竄出。本試體在完成實驗後，並進行炭化層之清除及分割，確認及量測炭化深度並計算炭化速率。

4.2.1 炭化速率評估

本研究採用 ISO 834-1 之加熱溫度曲線，圖 4-15 準加熱溫度曲線與實驗加溫曲線之比較，實驗加溫曲線在前 12 分鐘左右略高於標準加熱曲線，分別於第 3-5 分鐘以及第 9-11 分鐘，實驗加溫曲線高於溫度控制的上限值約 100-150°左右。由前述實驗記錄可知，本實驗約在 3 分鐘時可以從 CLT 板之中央拼接縫觀察到大量冒煙，與此時爐內升溫較快有一定關連性。另外，由於本次拼接處之開槽較拼接板尺寸稍大，因此研判可能因為拼接較不密合，亦導致大量冒煙竄出的現象。參考北美 CLT Handbook(參考 NDS 之數據)所建議之炭化深度速率，使用耐燃性

較佳之間苯二酚-甲醛樹脂(RF), 1 小時火害後之炭化層深度為 1.8in(約為 4.57cm), 可知炭化速率約為 0.76mm/min 之間。因此, 若以此炭化速率推估, 則曝火面第 1 層完全燒盡之時間約為 46 分鐘左右, 而 1 小時之炭化層深度約為 4.56cm 左右。由圖 4-16, E1 測溫點(曝火面第 1 層)約在 23 分鐘左右會開始偵測到火爐溫度(曝火面第 1 層燃燒一半深度), 與美國 NDS 所建議的炭化深度吻合。圖 4-17, F1 測溫點(曝火面第 1 層)約在 24 分鐘左右會開始偵測到火爐溫度(曝火面第 1 層燃燒一半深度), 亦呈現相同趨勢。

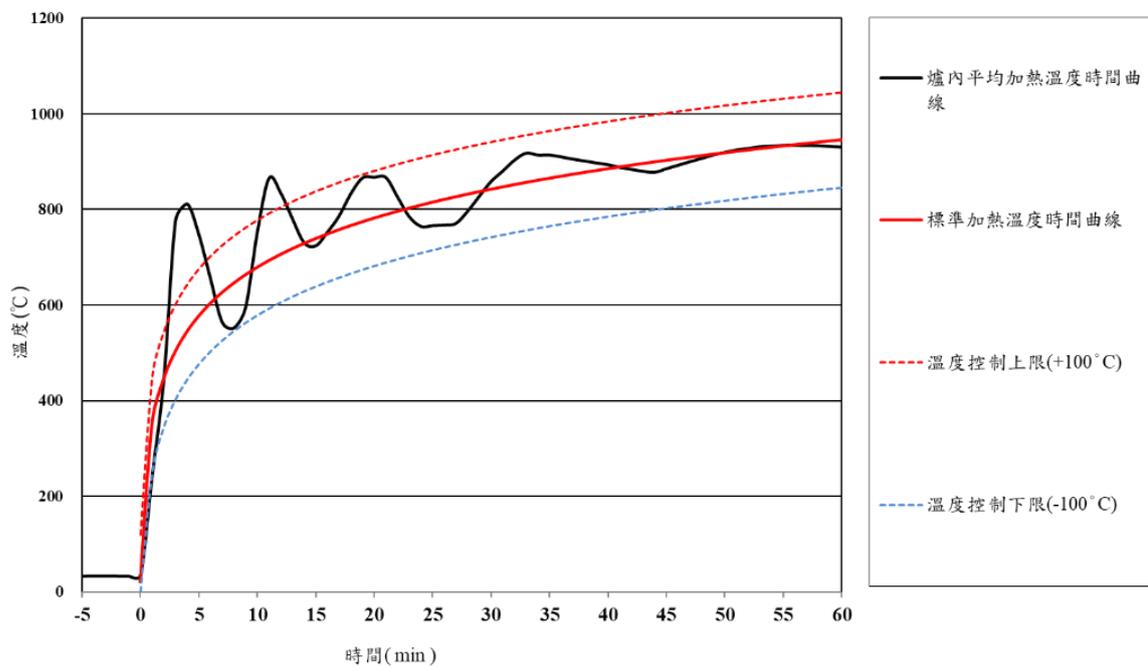


圖4-15 標準加熱溫度曲線與北美花旗松實驗加溫曲線之比較

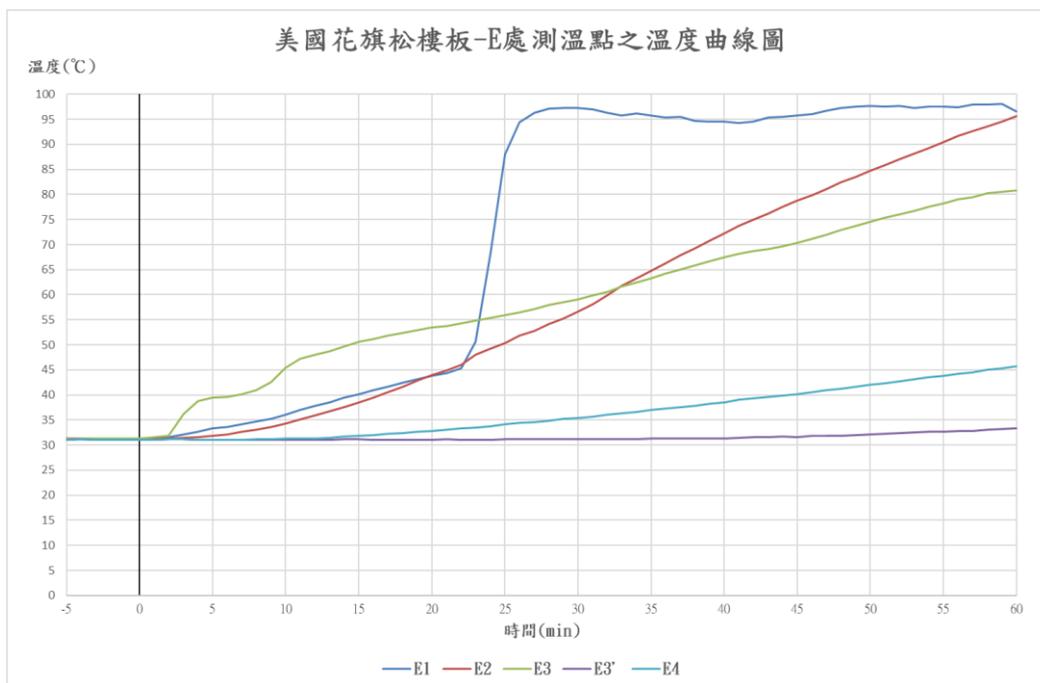


圖4-16 測溫點 E 點:不同深度測溫計之升溫曲線

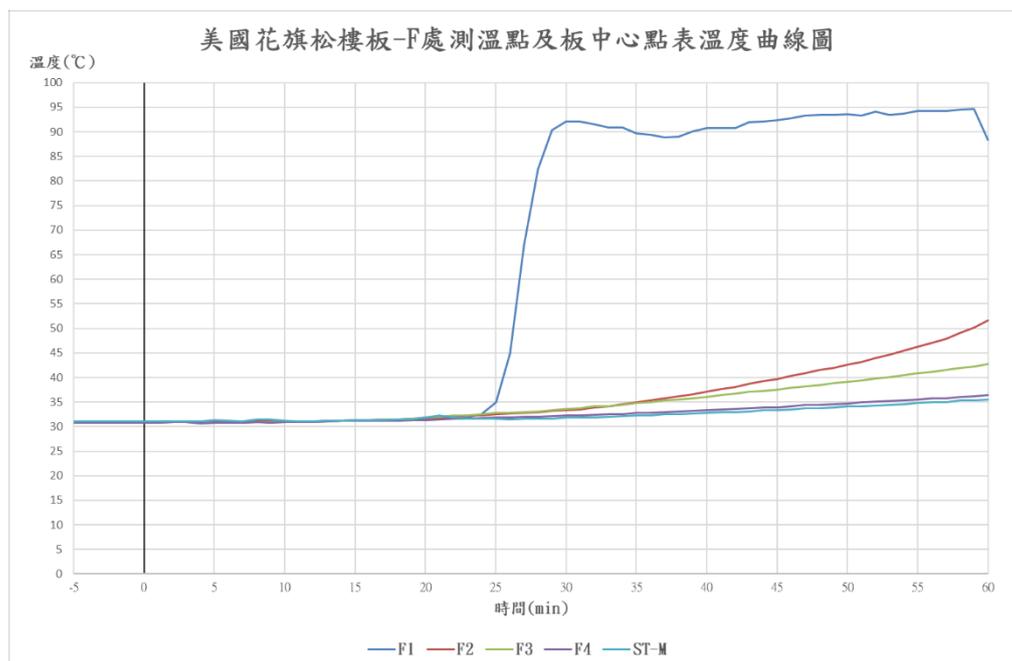


圖4-17 測溫點 F 點:不同深度測溫計之升溫曲線

由圖 4-18 曲變形曲線中可發現，大約在燃燒超過 50 分鐘時，樓板之撓曲變

形有突然增大的情形發生。此現象於前述章節中日本扁柏 CLT 之撓曲變形行為呈現相同趨勢，可研判為最底層(曝火面第 1 層)，即沿纖維方向之強軸集成元，已經完全炭化。此現象亦造成曝火面第 2 層開始受到燃燒，然而由於此層為弱軸，因此無法提供抗彎強度，造成斷面中立軸的急速偏移，而使得斷面的等值 EI 驟減，造成變形突然加大的現象。也由於此弱軸(曝火面第 2 層)並不提供抗彎強度僅做為防火層使用，因此斷面之等值 EI 固定，所以亦可觀察到燃燒超過 50 分鐘乃至 55 分鐘後，樓板的撓曲變形呈現變化不大的趨勢。

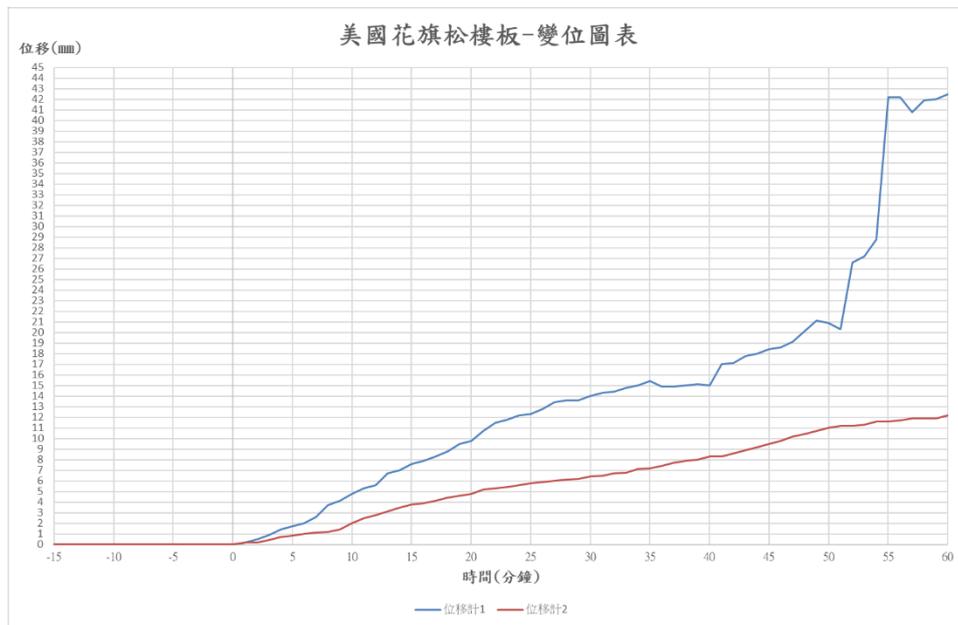


圖4-18 位移計 1 及 2 所量測之撓曲變形

4.2.2 炭化深度之量測

本次進行炭化測量之試體，為於 10 月 13 日完成火害實驗之北美花旗松 CLT 樓板 (5 層共 17.5cm)。其炭化層之量測及佈設規劃，主要透過將既有板片切割成寬 30cm 左右的大小，再將此切割後之單元每 30cm 左右進行一次炭化深度量測。由於樓板尺寸為 432cm*303cm，取中心線位置(151.5cm 處)標註 M，分別在左右兩側每 30cm 設一裁切點，因此共有 9 處斷面(圖 4-19)長向單元斷面以 30cm 為間隔進行測量，每一單元共計 14 個量測點位 (A 區 3 點、B 區 3 點、C 區 3 點、

D區3點、E區2點)。

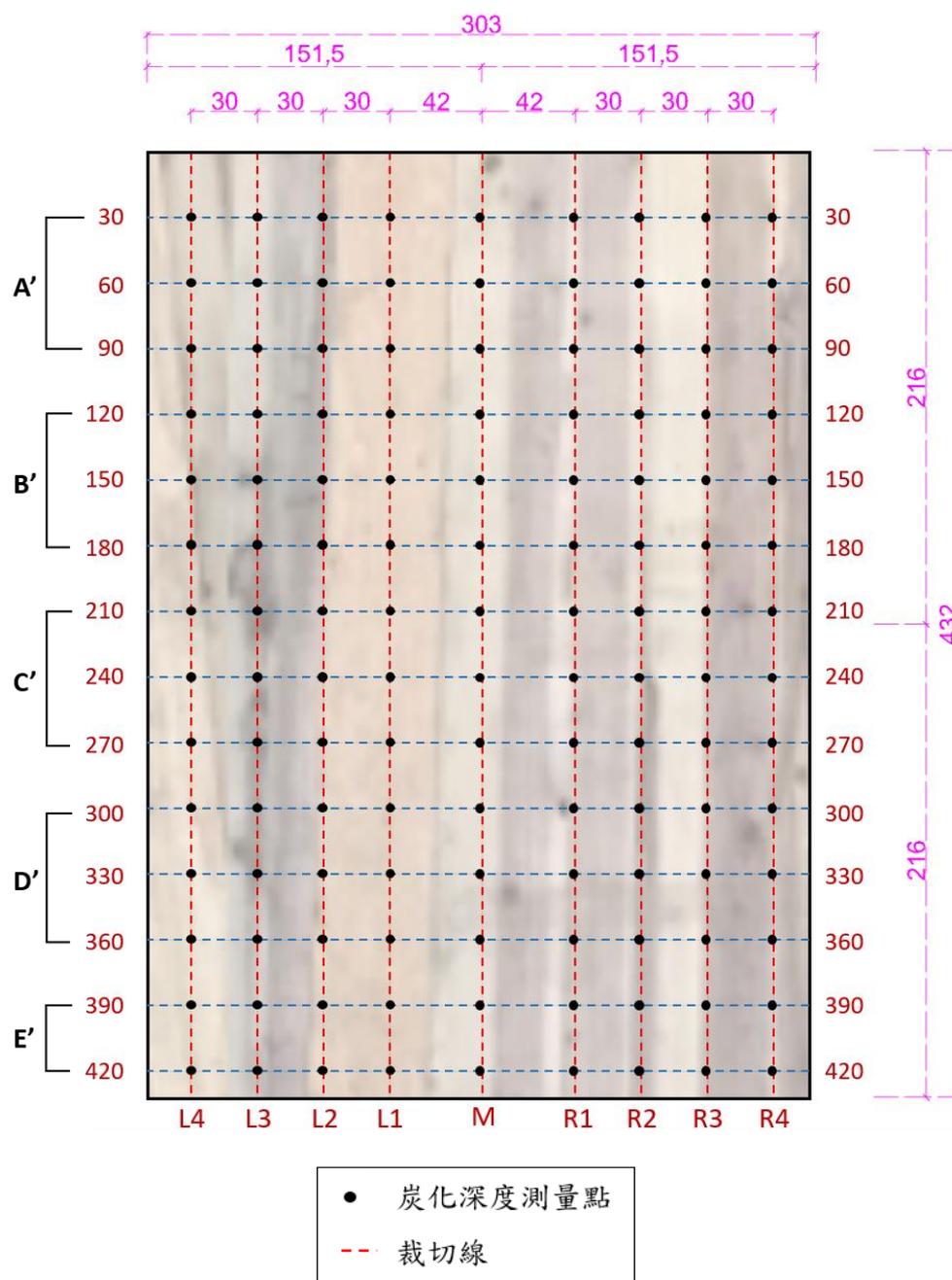


圖4-19 實驗試體每 30cm 分割成一個單元

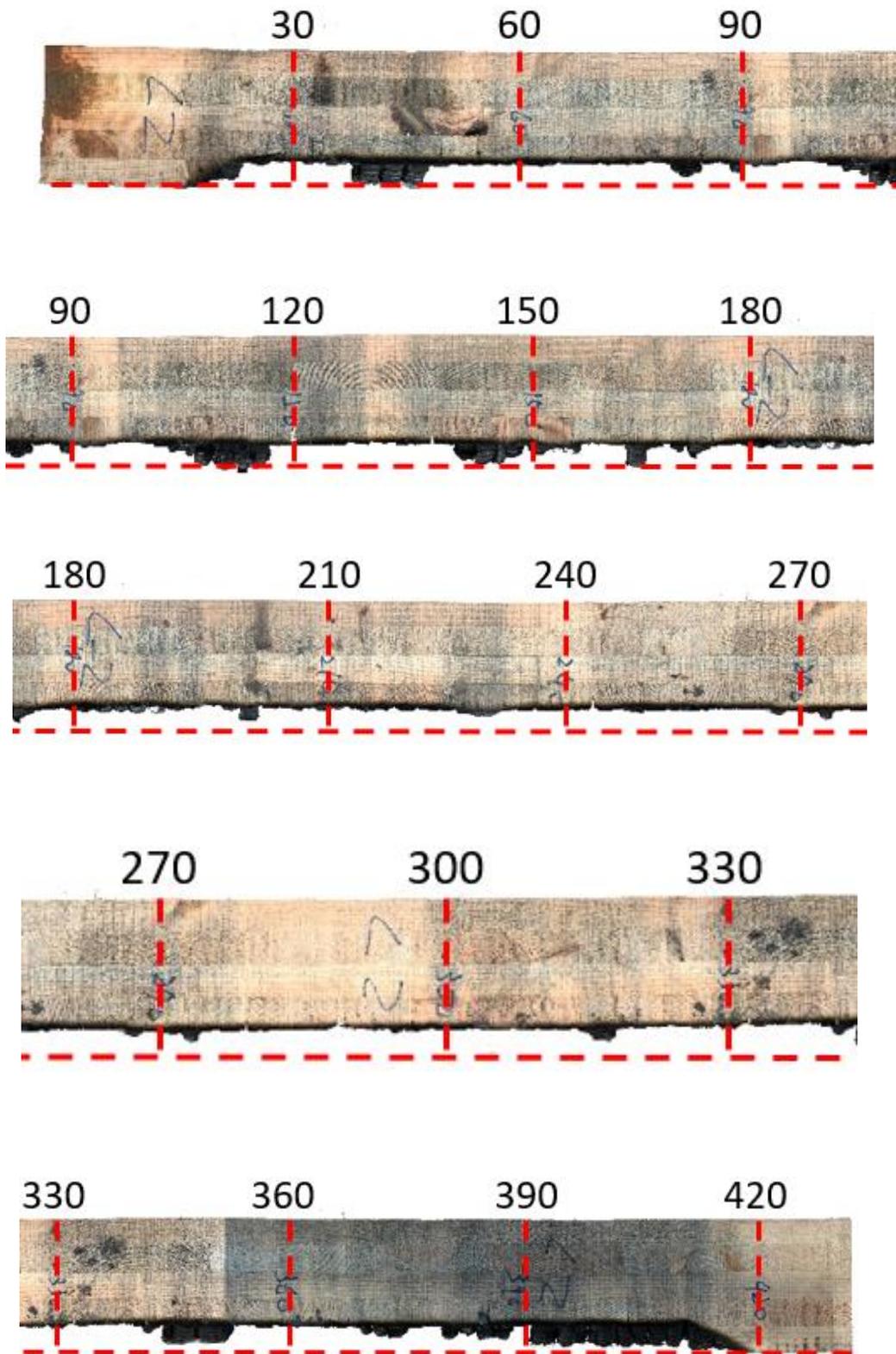


圖4-20 單元斷面以 30cm 為間隔之量測點位

北美花旗松 CLT 樓板的炭化深度量測亦採用由 Schaffer 提出的殘餘截面法。參考北美 CLT Handbook 之炭化層深度估算，以北美常用樹種之 1 小時的炭化深度為約為 1.5in(38mm)，其熱解層深度約為 0.3in(7.6mm)，因此考慮無強度層之總炭化深度則為 45.6mm(平均炭化速率 0.76 mm/min)。

各別切割後之 CLT 單元在間距 30cm 之炭化深度量測結果整理如表 4-5 及圖 4-21 其中，在拼接處 210cm-270cm 間之炭化深度為 6.6cm，其中搭接處的最大深度為 7.7cm，判斷由於搭接處並無法如同板本身緊密接合，因此會有火源竄入並造成炭化層較其他區域為大之情形。搭接處之平均炭化速率為 1.17mm/min，高於文獻值(界於 0.6mm-1.0mm 間)。其他非搭接部分的炭化深度約介於 4.1cm~4.9cm 左右，平均炭化速率介 0.68~0.82mm/min。與北美 CLT Handbook(參考 NDS 之數據)中建議的平均炭化速率 0.76 mm/min 相近。

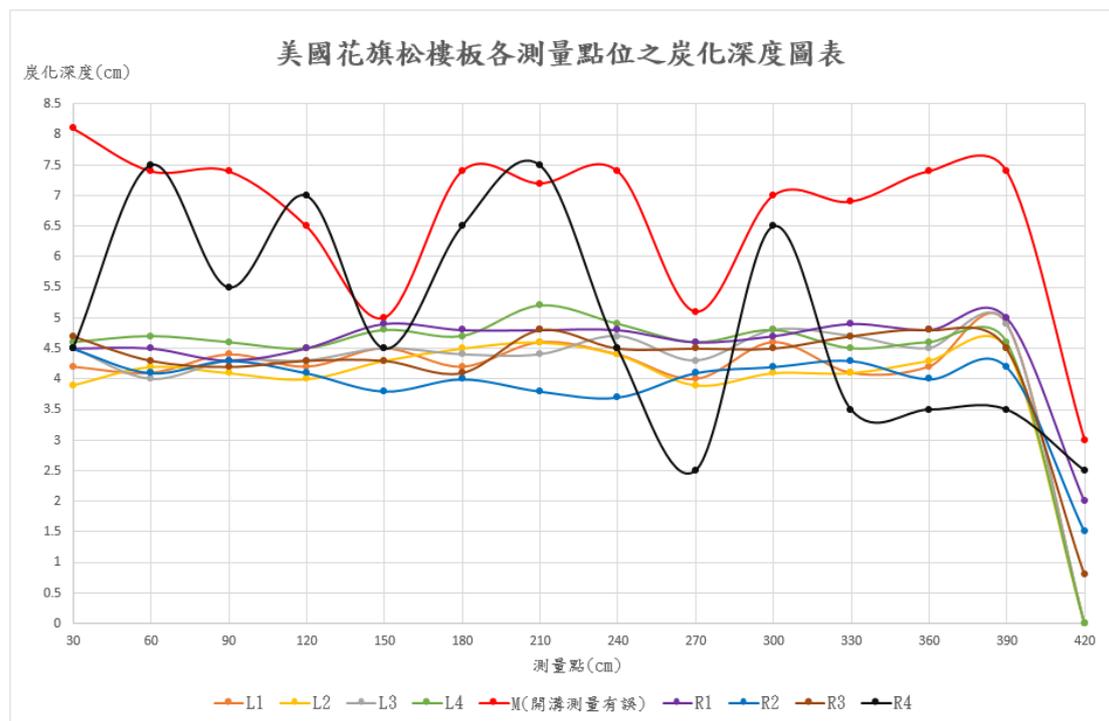


圖4-21 炭化深度量測結果

表4-5 北美花旗松 CLT 炭化深度量

美國花旗松接板之炭化層實驗(公分)																			
T: 熱解層深度/D: 炭化層深度 板厚: 17.5cm																			
	L1	L1' (炭化層平均)	L2	L2' (炭化層平均)	L3	L3' (炭化層平均)	L4	L4' (炭化層平均)	M(開溝測量有誤)	M' (炭化層平均)	R1	R1' (炭化層平均)	R2	R2' (炭化層平均)	R3	R3' (炭化層平均)	R4	R4' (炭化層平均)	
30	T 0.5 D 4.2		0.6 3.9		0.5 4.5		0.4 4.6		0.3 8.1		0.5 4.5		0.3 4.5		0.4 4.7		0.5 4.5		
60	T 0.6 D 4.1	L1A' 4.2	0.2 4.2	L2A' 4.1	0.9 4	L3A' 4.3	0.4 4.7	L4A' 4.6	0.1 7.4	R1A' 7.6	0.3 4.5	R2A' 4.4	0.4 4.1	R3A' 4.3	0.4 4.3	R4A' 4.4	0.5 7.5	R5A' 5.8	
90	T 0.5 D 4.4		0.4 4.1		0.6 4.3		0.4 4.6		0.5 7.4		0.4 4.3		0.4 4.3		0.5 4.2		0.5 5.5		
120	T 0.4 D 4.2		0.5 4		0.6 4.3		0.4 4.5		1 6.5		0.2 4.5		0.4 4.1		0.7 4.3		0.5 7		
150	T 0.3 D 4.5	L1B' 4.3	0.5 4.3	L2B' 4.3	0.4 4.5	L3B' 4.4	0.4 4.8	L4B' 4.7	0.2 5	R1B' 6.3	0.3 4.9	R2B' 4.7	0.4 3.8	R3B' 4.0	0.5 4.3	R4B' 4.2	0.5 4.5	R5B' 6.0	
180	T 0.6 D 4.2		0.5 4.5		0.7 4.4		0.5 4.7		1 7.4		0.4 4.8		0.3 4		0.7 4.1		0.5 6.5		
210	T 0.4 D 4.6		0.4 4.6		0.5 4.4		0.1 5.2		0.5 7.2		0.3 4.8		0.5 3.8		0.2 4.8		0.5 7.5		
240	T 0.5 D 4.4	L1C' 4.3	0.5 4.4	L2C' 4.3	0.4 4.7	L3C' 4.5	0.3 4.9	L4C' 4.9	1 7.4	R1C' 6.6	0.3 4.8	R2C' 4.7	0.5 3.7	R3C' 3.9	0.3 4.5	R4C' 4.6	0.5 4.5	R5C' 4.8	
270	T 0.5 D 4		0.4 3.9		0.4 4.3		0.3 4.6		1 5.1		0.2 4.6		0.4 4.1		0.5 4.5		0.5 2.5		
300	T 0.2 D 4.6		0.4 4.1		0.2 4.8		0.3 4.8		1 7		0.4 4.7		0.4 4.2		0.5 4.5		0.5 6.5		
330	T 0.4 D 4.1	L1D' 4.3	0.4 4.1	L2D' 4.2	0.2 4.7	L3D' 4.7	0.5 4.5	L4D' 4.6	2 6.9	R1D' 7.1	0.4 4.9	R2D' 4.8	0.4 4.3	R3D' 4.2	0.4 4.7	R4D' 4.7	1 3.5	R5D' 4.5	
360	T 0.5 D 4.2		0.6 4.3		0.4 4.5		0.3 4.6		0.1 7.4		0.3 4.8		0.5 4		0.3 4.8		0.5 3.5		
390	T 0.2 D 4.9	L1E' 2.5	0.4 4.5	L2E' 2.3	0.5 4.9	L3E' 2.5	0.4 4.6	L4E' 2.3	0.1 7.4	R1E' 5.2	0.1 5	R2E' 3.5	0.5 4.2	R3E' 2.9	0.5 4.5	R4E' 3	0.5 3.5	R5E' 3	
420	T 0 D 0		0 0		0 0		0 0		1 3		1 2		0.4 1.5		0.5 0.8		1 2.5		

4.2.3 火害後之殘餘樓板斷面等值 EI 評估

本研究之北美花旗松 CLT 樓板在經過 1 小時火害實驗後，可透過炭化深度的量測得到其碳化速率約為 0.7mm/min，本評估即以此數據進行計算。

(1) 當試體尚未進行燃燒時，其斷面如圖 4-22 所示：

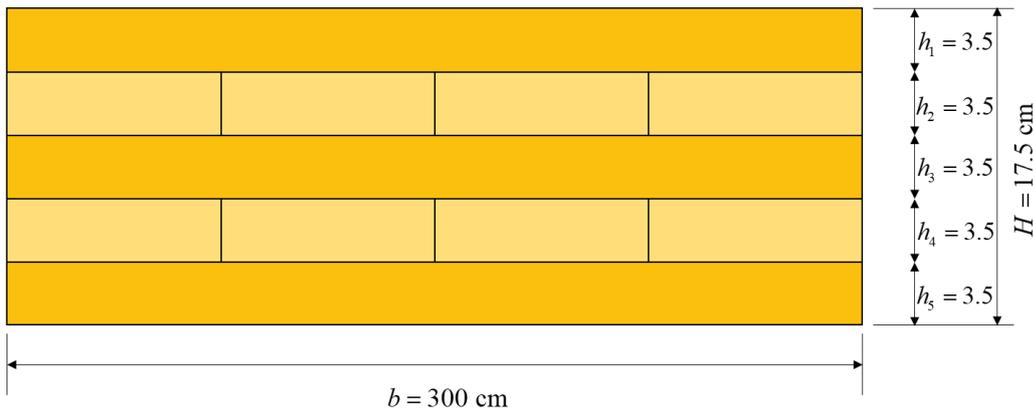


圖4-22 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒前示意圖

■ 碳化深度:0 (cm)

$$E_i : E_1 = E_3 = E_5 = 9.5 \text{ (Gpa)} = 9.68 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ , } E_2 = E_4 = 0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$y_i : y_1 = 1.75 \text{ (cm)} \text{ , } y_2 = 5.25 \text{ (cm)} \text{ , } y_3 = 8.75 \text{ (cm)} \text{ , } y_4 = 12.25 \text{ (cm)} \text{ , } y_5 = 15.75 \text{ (cm)}$$

$$h_i : h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = 3.5 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 y_i h_i E_i &= 1.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 5.25 \times 3.5 \times 0 + 8.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 \\ &\quad + 12.25 \times 3.5 \times 0 + 15.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 \\ &= 8893500 \text{ (cm}^6\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 h_i E_i &= 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 3.5 \times 0 + 3.5 \times 9.68 \times 10^4 \\ &\quad + 3.5 \times 0 + 3.5 \times 9.68 \times 10^4 \end{aligned}$$

$$= 1016400 \text{ (cm}^5\text{)}$$

$$\text{中立軸: } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^5 y_i h_i E_i}{\sum_{i=1}^5 h_i E_i} = \frac{8893500}{1016400} = 8.75 \text{ (cm)}$$

$$d_i = y_i - \bar{y}: d_1 = 1.75 - 8.75 = -7 \text{ (cm)}、d_2 = 5.25 - 8.75 = -3.5 \text{ (cm)}$$

$$、d_3 = 8.75 - 8.75 = 0 \text{ (cm)}、d_4 = 12.25 - 8.75 = 3.5 \text{ (cm)}、d_5 = 15.75 - 8.75 = 7 \text{ (cm)}$$

$$\sum_{i=1}^5 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i = \frac{1}{12} (300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5^3 \times 0 + 300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4$$

$$+ 300 \times 3.5^3 \times 0 + 300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4)$$

$$= 311272500 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

$$\sum_{i=1}^5 b_i h_i d_i^2 E_i = 300 \times 3.5 \times (-7)^2 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5 \times (-3.5)^2 \times 0 + 300 \times 3.5 \times 0^2 \times 9.68 \times 10^4$$

$$+ 300 \times 3.5 \times (3.5)^2 \times 0 + 300 \times 3.5 \times (7)^2 \times 9.68 \times 10^4$$

$$= 9960720000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^5 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_{i=1}^5 b_i h_i d_i^2 E_i = 311272500 + 9960720000 = 10.27 \times 10^9 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

上述計算結果可整理成如下表格:

表4-6 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒前 EI_{eff} 計算表

層	E_i ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	b_i (cm)	碳化 深度 (cm)	h_i (cm)	A_i (cm^2)	y_i (cm)	\bar{y} (cm)	d_i (cm)	$E_i I_i$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	$E_i A_i d_i^2$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{eff} ($10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)
5	9.68	300	0	3.5	1050	1.75	8.75	-7	10375.75	498036	10.27
4	0	300	0	3.5	1050	5.25		-3.5	0	0	
3	9.68	300	0	3.5	1050	8.75		0	10375.75	0	
2	0	300	0	3.5	1050	12.25		3.5	0	0	
1	9.68	300	0	3.5	1050	15.75		7	10375.75	498036	

(2) 當試體第 1 層完全碳化，其斷面如圖 4-23 所示：

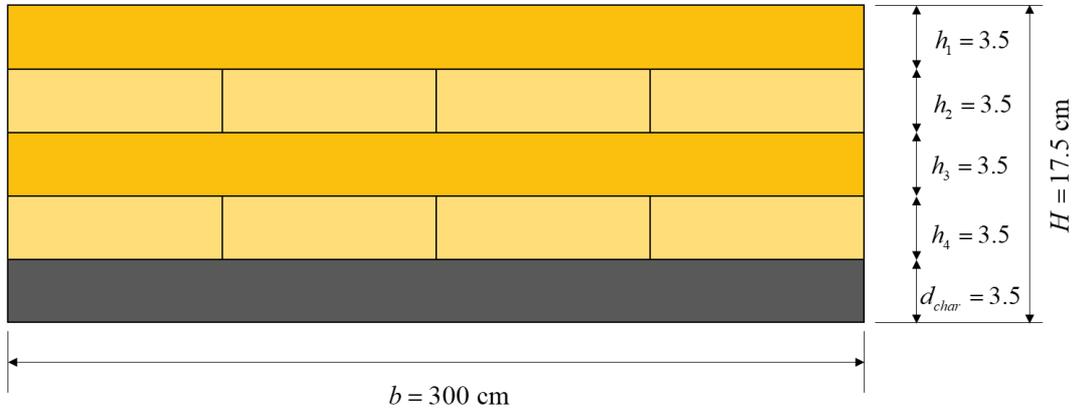


圖4-23 美國花旗松 CLT 樓板試體第 5 層完全碳化示意圖

■ 碳化深度:3.5 (cm)

$$E_i : E_1 = E_3 = 9.5 \text{ (Gpa)} = 9.68 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ 、 } E_2 = E_4 = E_5 = 0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$y_i : y_1 = 1.75 \text{ (cm)} \text{ 、 } y_2 = 5.25 \text{ (cm)} \text{ 、 } y_3 = 8.75 \text{ (cm)} \text{ 、 } y_4 = 12.25 \text{ (cm)}$$

$$h_i : h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 3.5 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i &= 1.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 5.52 \times 3.5 \times 0 + 8.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 12.25 \times 3.5 \times 0 \\ &= 3557400 \text{ (cm}^6\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 h_i E_i &= 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 3.5 \times 0 + 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 3.5 \times 0 \\ &= 677600 \text{ (cm}^5\text{)} \end{aligned}$$

$$\text{中立軸: } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i}{\sum_{i=1}^4 h_i E_i} = \frac{3557400}{677600} = 5.25 \text{ (cm)}$$

$$d_i = y_i - \bar{y} : d_1 = 1.75 - 5.25 = -3.5 \text{ (cm)} \text{ 、 } d_2 = 5.25 - 5.25 = 0 \text{ (cm)}$$

$$d_3 = 8.75 - 5.25 = 3.5 \text{ (cm)} \quad d_4 = 12.25 - 5.25 = 7 \text{ (cm)}$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i = \frac{1}{12} (300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5^3 \times 0 + 300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5^3 \times 0)$$

$$= 207515000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2)$$

$$\sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 300 \times 3.5 \times (-3.5)^2 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5 \times (0)^2 \times 0 + 300 \times 3.5 \times 3.5^2 \times 9.68 \times 10^4$$

$$+ 300 \times 3.5 \times (7)^2 \times 0$$

$$= 2490180000 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2)$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 207515000 + 2490180000 = 2.70 \times 10^9 \text{ (kgf} \cdot \text{cm}^2)$$

表4-7 美國花旗松 CLT 樓板試體第 5 層完全碳化 EI_{eff} 計算表

層	E_i ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	b_i (cm)	碳化 深度 (cm)	h_i (cm)	A_i (cm^2)	y_i (cm)	\bar{y} (cm)	d_i (cm)	$E_i I_i$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	$E_i A_i d_i^2$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{eff} ($10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)
5	9.68	300	0	3.5	1050	1.75	5.25	-3.5	10375.75	124509	2.70
4	0	300	0	3.5	1050	5.25		0	0	0	
3	9.68	300	0	3.5	1050	8.75		3.5	10375.75	124509	
2	0	300	0	3.5	1050	12.25		7	0	0	
1	0	300	3.5	0							

(3) 當試體燃燒 60 分鐘，其斷面如圖 4-24 所示：

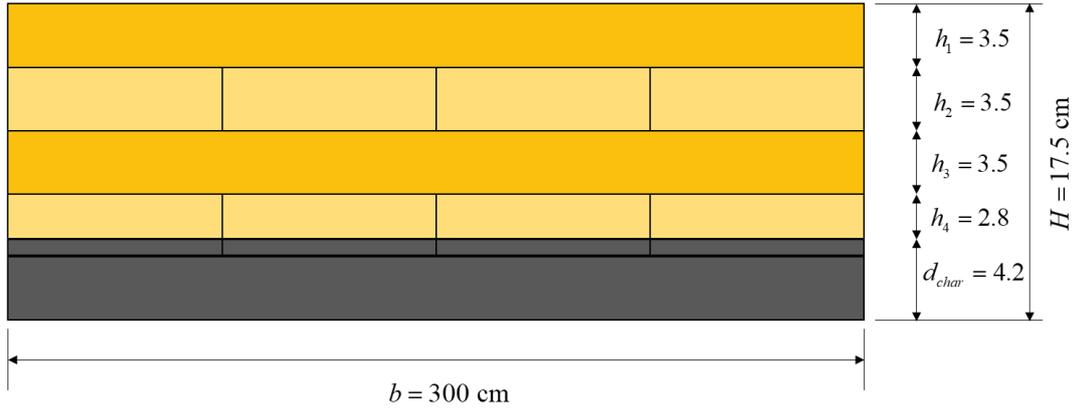


圖4-24 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘示意圖

■ 碳化深度: $d_{char} = 0.07 \times 60 = 4.2$ (cm)

$$E_i: E_1 = E_3 = 9.5 \text{ (Gpa)} = 9.68 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{、} E_2 = E_4 = E_5 = 0 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$y_i: y_1 = 1.75 \text{ (cm)} \text{、} y_2 = 5.25 \text{ (cm)} \text{、} y_3 = 8.75 \text{ (cm)} \text{、} y_4 = 11.9 \text{ (cm)}$$

$$h_i: h_1 = h_2 = h_3 = 3.5 \text{ (cm)} \text{、} h_4 = 2.8 \text{ (cm)}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i &= 1.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 5.25 \times 3.5 \times 0 + 8.75 \times 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 11.9 \times 2.8 \times 0 \\ &= 3557400 \text{ (cm}^6\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 h_i E_i &= 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 3.5 \times 0 + 3.5 \times 9.68 \times 10^4 + 2.8 \times 0 \\ &= 677600 \text{ (cm}^5\text{)} \end{aligned}$$

$$\text{中立軸: } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i h_i E_i}{\sum_{i=1}^4 h_i E_i} = \frac{3557400}{677600} = 5.25 \text{ (cm)}$$

$$d_i = y_i - \bar{y}: d_1 = 1.75 - 5.25 = -3.5 \text{ (cm)} \text{、} d_2 = 5.25 - 5.25 = 0 \text{ (cm)}$$

$$\text{、} d_3 = 8.75 - 5.25 = 3.5 \text{ (cm)} \text{、} d_4 = 11.9 - 5.25 = 6.65 \text{ (cm)}$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i = \frac{1}{12} (300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5^3 \times 0 + 300 \times 3.5^3 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 2.8^3 \times 0)$$

$$= 207515000(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i &= 300 \times 3.5 \times (-3.5)^2 \times 9.68 \times 10^4 + 300 \times 3.5 \times (0)^2 \times 0 + 300 \times 3.5 \times 3.5^2 \times 9.68 \times 10^4 \\ &\quad + 300 \times 2.8 \times (6.65)^2 \times 0 \\ &= 2490180000(\text{kgf} \cdot \text{cm}^2) \end{aligned}$$

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^4 \frac{b_i h_i^3}{12} E_i + \sum_{i=1}^4 b_i h_i d_i^2 E_i = 207515000 + 2490180000 = 2.70 \times 10^9 (\text{kgf} \cdot \text{cm}^2)$$

表4-8 美國花旗松 CLT 樓板試體燃燒 60 分鐘 EI_{eff} 計算表

層	E_i ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	b_i (cm)	碳化 深度 (cm)	h_i (cm)	A_i (cm^2)	y_i (cm)	\bar{y} (cm)	d_i (cm)	$E_i I_i$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	$E_i A_i d_i^2$ ($10^4 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{eff} ($10^9 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$)
5	9.68	300	0	3.5	1050	1.75	5.25	-3.5	10375.75	124509	2.70
4	0	300	0	3.5	1050	5.25		0	0	0	
3	9.68	300	0	3.5	1050	8.75		3.5	10375.75	124509	
2	0	300	0.7	2.8	840	11.9		6.65	0	0	
1	0	300	3.5	0							

第三節 國產柳杉 CLT 牆板

4.3.1 炭化深度評估

本實驗於內政部建築研究所防火實驗中心進行，實驗開始時間為 109 年 10 月 29 日下午 15 時 07 分 45 秒，實驗開始前在牆板試體下方利用油壓機及千斤頂預加 24.3 噸之載重，用以模擬牆板承壓之行為。實驗過程的現象紀錄方面，實驗進行約 5 分時，可觀測到從拼接處開始冒煙，此現象持續不斷且亦有煙不斷竄

出，約 22 分左右試體之四個角落開始有大量煙從縫隙竄出，實驗進行到 34 分 22 秒時，於左右二處的拼接處開始大量冒煙。另外，為了確定在實驗過程中，加載載重不會因為樓板之變形而產生油壓機加載下降之現象，因此透過觀測並微調確保加載值保持在 5% 的差異內。加載紀錄分別為於 7 分 52 秒時加載為 24.2 噸，13 分 09 秒時加載為 24.1 噸，17 分 22 秒時加載為 24.0 噸，30 分 20 秒時加載為 23.8 噸，至實驗結束時加載保持在約 23.8 噸左右，屬於合理的加載範圍區間。實驗結束後，先將所有測溫線(熱電偶)從儀器中取出，再將試體吊出，並噴水降溫。完成之試體亦進行分割及加工，以利後續進行炭化層量測。

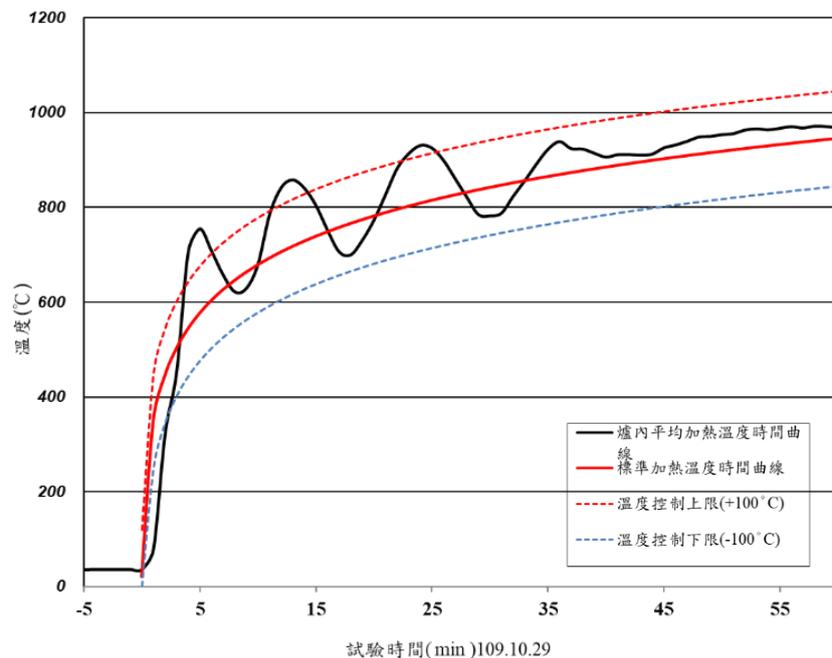


圖4-25 標準加熱溫度曲線與北美花旗松實驗加熱曲線之比較

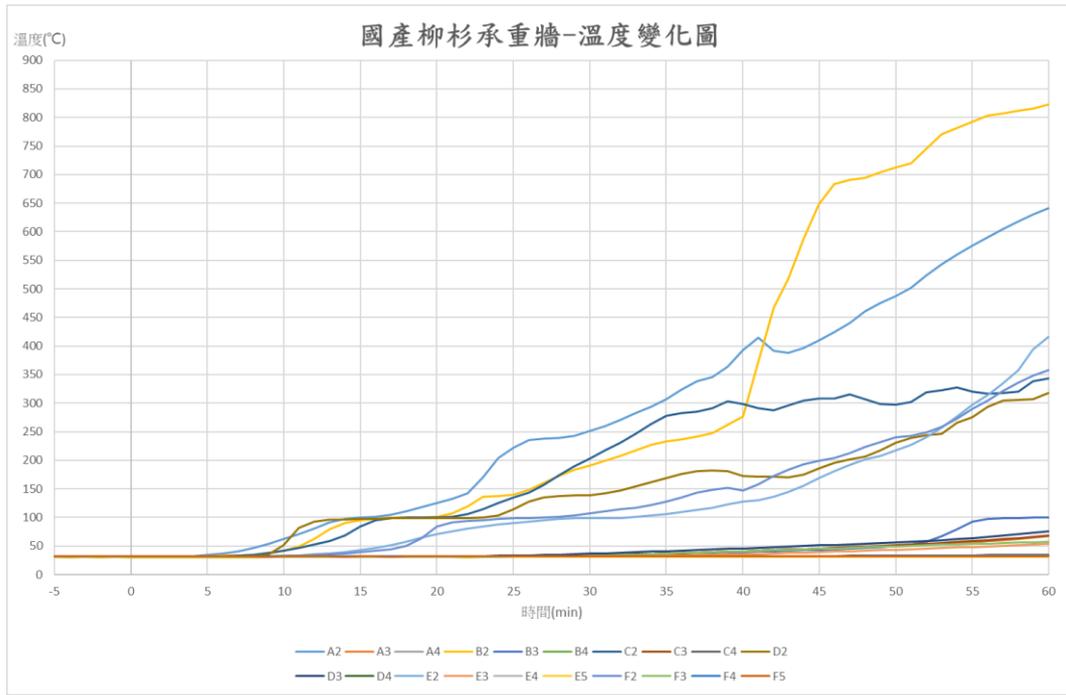


圖4-26 各量測點不同深度測溫計之升溫曲線

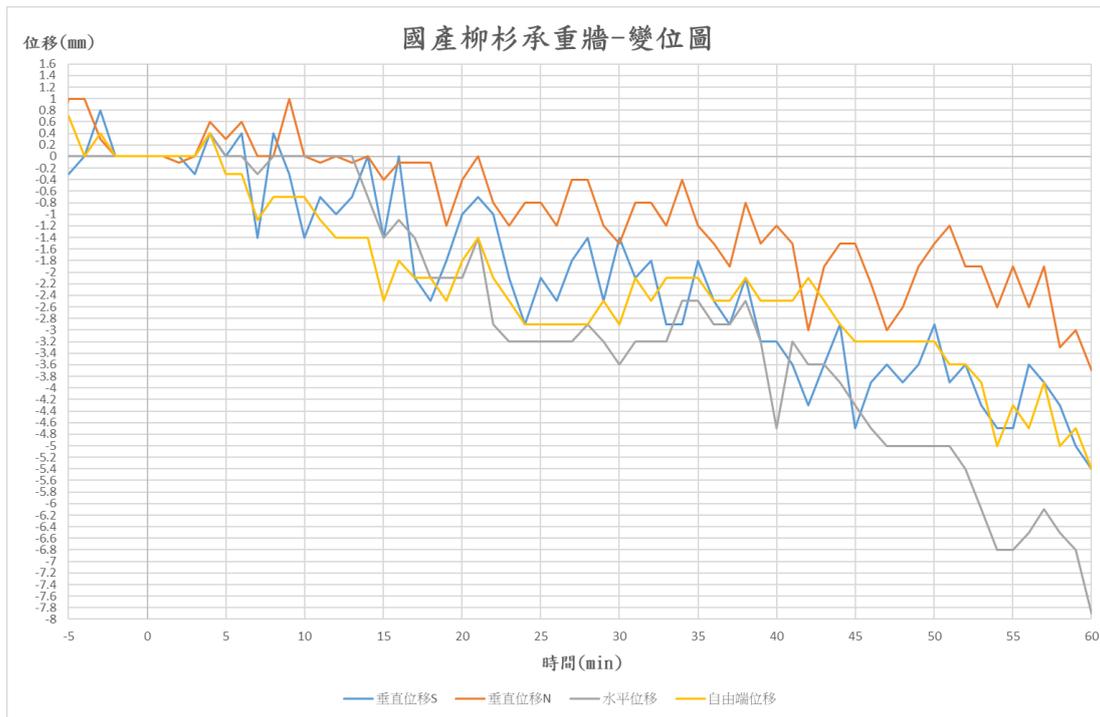


圖4-27 實驗各量測點之變形

4.3.2 炭化深度之量測

本次進行炭化測量之試體，為於 10 月 29 日完成火害實驗之國產柳杉 CLT 牆板 (5 層共 18cm)。其炭化層之量測及佈設規劃如前述之 CLT 樓板試體，將既有板片切割成同寬的大小，再將此切割後之單元每 30cm 左右進行一次炭化深度量測。由於樓板尺寸為 300cm*300cm，取中心線位置標註 M，分別在左右兩側每 41.5cm 設一裁切點，因此共有 8 處斷面(如圖 4-28)。每條長向單元斷面以 30cm 為間隔進行測量，每一單元共計 14 個量測點位。(30cm、60cm、90cm、120cm、150cm、180cm、210cm、240cm、270cm、300cm、330cm、360cm、390cm 及 420cm) (圖 4-29)

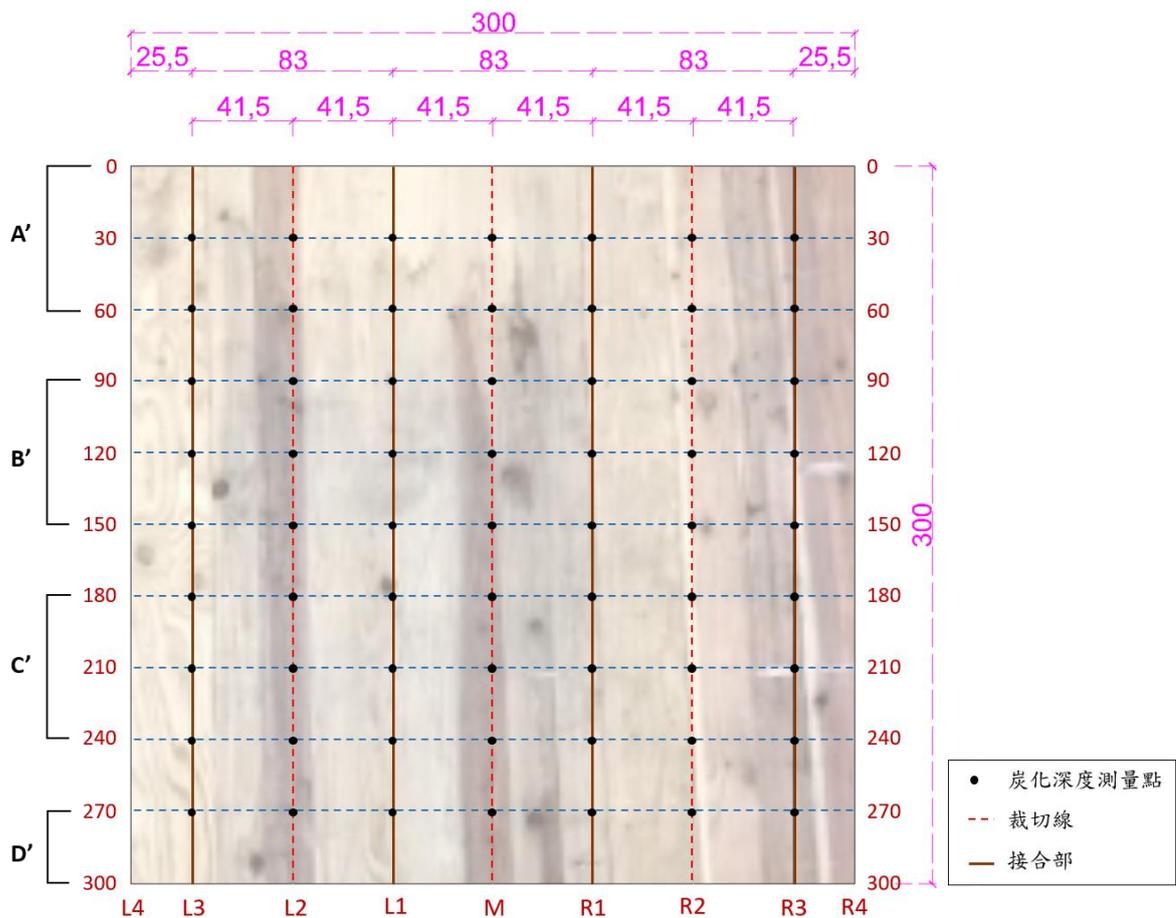


圖4-28 實驗試體每 30cm 分割成一個單元

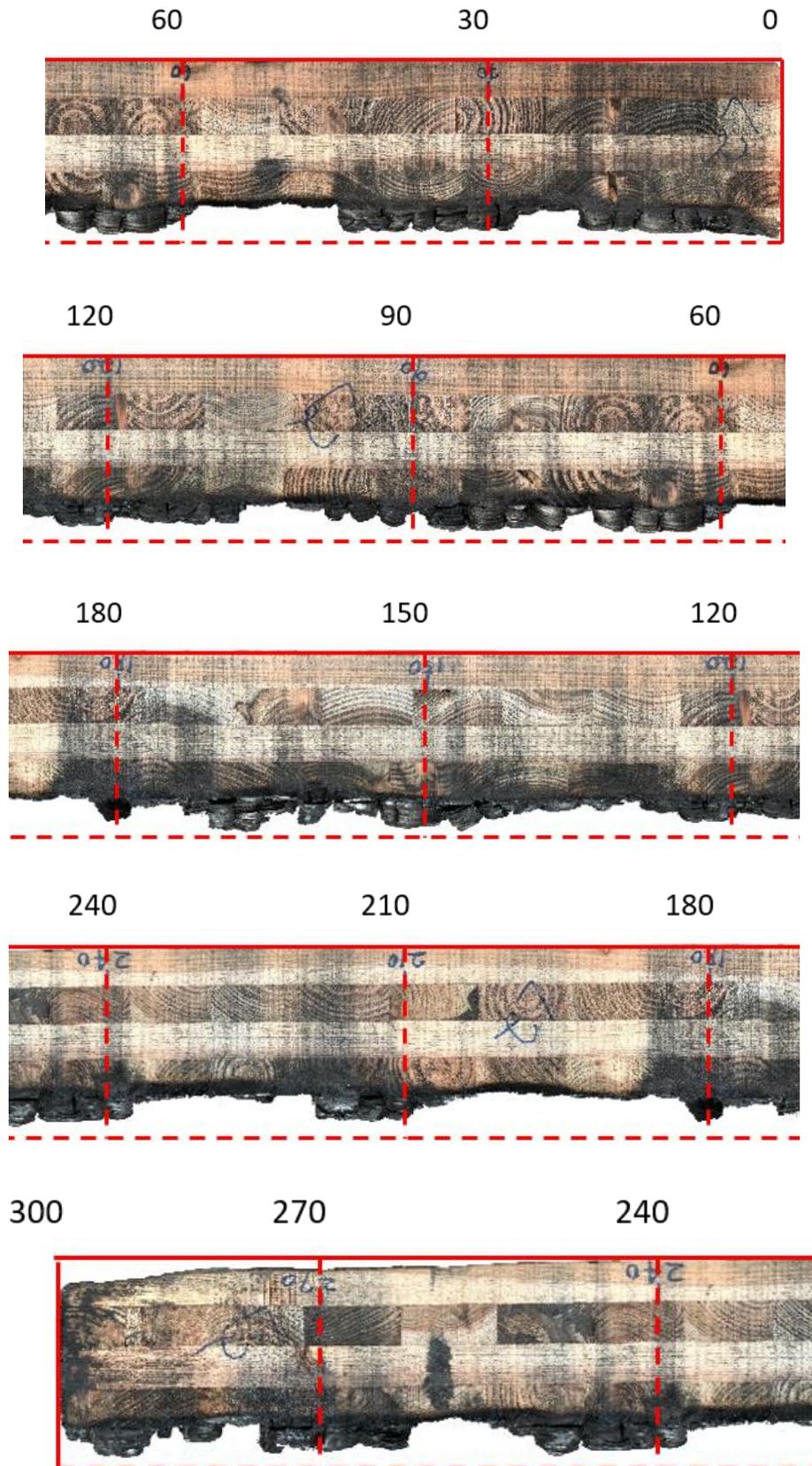


圖4-29 單元斷面以 30cm 為間隔之量測點位

各別切割後之 CLT 單元在間距 30cm 之炭化深度量測結果整理如表 4-9 及圖 4-30。其中，在 210cm-270cm 間有最大深度為 7.1cm 的炭化層產生，此最大炭化深度發生在兩塊 CLT 板之搭接處，判斷由於搭接處並無法如同板本身緊密接合，因此會有火源竄入並造成炭化層較其他區域為大之情形。此部分之平均炭化速率為 1.18mm/min，高於文獻值(界於 0.6mm-1.0mm 間)。其他非搭接部分的炭化深度約介於 4.4cm~5.1cm 左右，平均炭化速率介 0.73~0.84mm/min。略高於日本國土交通省建議的炭化速率值(制式工法建議炭化深度值為 4.5cm)。

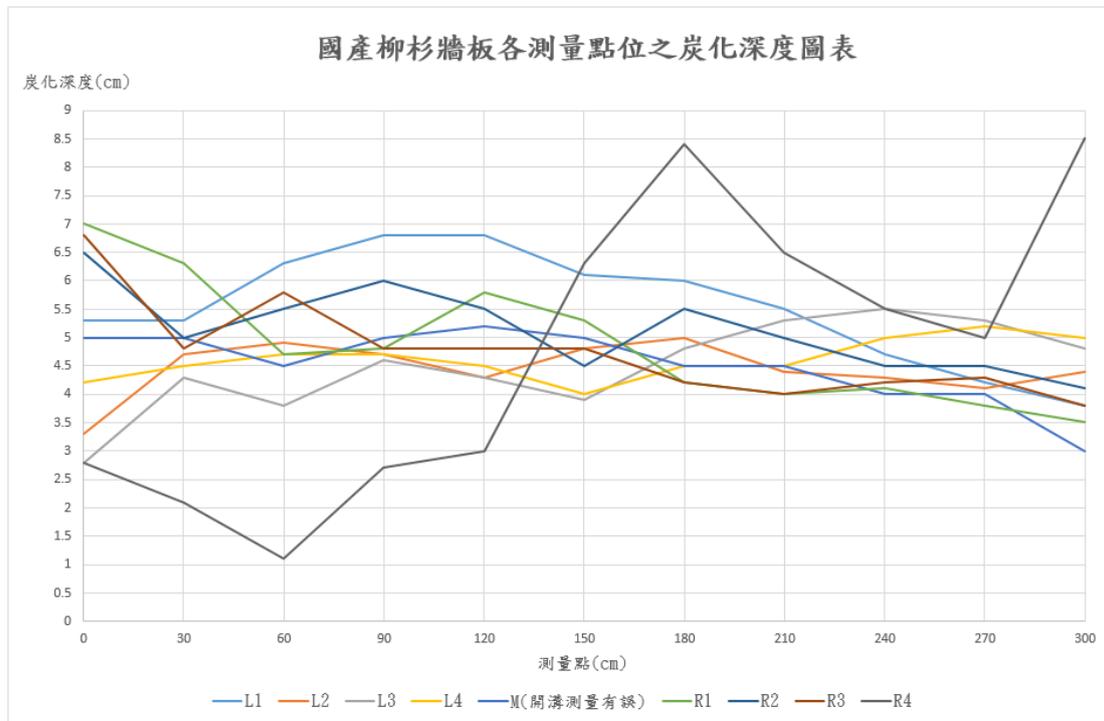


圖4-30 炭化深度量測結果

表4-9 國產柳杉 CLT 炭化深度量測結

國產柳杉牆板之炭化層實驗(公分)																		
T: 熱解層深度/D: 炭化層深度																		
	L1	L1' (炭化層平均)	L2	L2' (炭化層平均)	L3	L3' (炭化層平均)	L4	L4' (炭化層平均)	MC(開溝測量有誤)	M' (炭化層平均)	R1	R1' (炭化層平均)	R2	R2' (炭化層平均)	R3	R3' (炭化層平均)	R4	R4' (炭化層平均)
0	T 1.5 D 5.3		0.5 3.3		0.1 2.8		0.5 4.2		0.2 5		1.8 7		0.5 6.5		1 6.8		0.7 2.8	
30	T 1 D 5.3	L1A' 5.6	0.3 4.7	L2A' 4.3	0.3 4.3	L3A' 3.6	0.5 4.5	L4A' 4.5	0.5	R1A' 4.8	0.7 6.3	R2A' 6	1.5 5	R3A' 5.7	1 4.8	R4A' 5.8	1.2 2.1	R5A' 2.0
60	T 0.4 D 6.3		0.5 4.9		0.2 3.8		0.5 4.7		0.5 4.5		0.1 4.7		0.5 5.5		1 5.8		1.4 1.1	
90	T 1 D 6.8		0.2 4.7		0.4 4.6		0.5 4.7		0.8 5		0.7 4.8		0.5 6		0.7 4.8		0.8 2.7	
120	T 1 D 6.8	L1B' 6.6	0.3 4.3	L2B' 4.6	0.3 4.3	L3B' 4.3	0.4 4.5	L4B' 4.4	0.8 5.2	R1B' 5.1	1 5.8	R2B' 5.3	0.5 5.5	R3B' 5.3	0.5 4.8	R4B' 4.8	0.5 3	R5B' 4.0
150	T 0.7 D 6.1		0.4 4.8		0.6 3.9		0.5 4		0.5 5		1.5 5.3		1 4.5		0.5 4.8		0.4 6.3	
180	T 0.8 D 6		0.4 5		0.5 4.8		0.5 4.5		0.5 4.5		2 4.2		0.5 5.5		0.5 4.2		0.5 8.4	
210	T 1.1 D 5.5	L1C' 5.4	0.5 4.4	L2C' 4.6	0.5 5.3	L3C' 5.2	0.5 4.5	L4C' 4.67	1 4.5	R1C' 4.3	1 4	R2C' 4.1	0.5 5	R3C' 5.0	0.7 4	R4C' 4.1	0.5 6.5	R5C' 6.8
240	T 1.9 D 4.7		0.4 4.3		0.8 5.5		0.5 5		0.5 4		1 4.1		0.5 4.5		1 4.2		0.5 5.5	
270	T 0.5 D 4.2		0.5 4.1		0.5 5.3		0.5 5.2		0.5 4		1 3.8		0.5 4.5		1 4.3		0.7 5	
300	T 0.5 D 3.8	L1D' 4.0	0.5 4.4	L2D' 4.3	0.5 4.8	L3D' 5.1	0.5 5	L4D' 5.1	0.5 3	R1D' 3.5	2 3.5	R2D' 3.7	0.5 4.1	R3D' 4.3	0.5 3.8	R4D' 4.1	1.5 8.5	R5D' 6.8

第四節 火害之撓曲變形理論值與實驗值比較

由上述的評估方法，可決定在不同火害時間點之炭化深度，及其殘餘斷面之等值 EI 值。當殘餘斷面之等值 EI 值被決定了之後，接著則可透過撓曲變形公式來求得 CLT 樓板之殘餘強度，或是透過牆板的極限挫屈強度公式，決定 CLT 牆板的極限承載能力。另外，由於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且炭化層具有阻熱效果，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。因此，本研究之炭化速率已考慮時間長短之影響因素，引用 NDS 中將平均炭化速率換算成隨時間長短變化之方程式(式 4-4)，進行等值 EI 之計算及後續與實驗量測之撓曲變形做比較。

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

$$a_{char} = \beta_{eff}t = 1.2\beta_n t^{0.813} \quad (4-4)$$

根據上節方法計算出 CLT 樓板在燃燒時所對應的殘餘斷面等值 EI，考慮時間長短之影響因素，可藉由撓曲變形公式進一步求得試體在燃燒過程的撓曲變形歷時曲線。如圖 4-33 所示，將炭化速率為 0.7mm/min 之撓曲變形歷時曲線與實驗實際測得之結果比較，以日本扁柏 CLT 樓板為例，可以發現的實際炭化速率在曝火面第 1 層完全燃燒後，撓曲變形量差異不大。從實驗結果來看，當曝火面第 1 層(最底層)完全炭化，約耗時 42~43 分鐘，底層主軸由曝火面第 1 層集成元的強軸變為曝火面第 2 層集成元的弱軸，因此造成撓度大幅度的增加。然而，若以理論公式的分析結果可知，曝火面第 1 層(最底層)完全炭化約耗時 31~32 分鐘，較實驗值快速，顯示理論值較為保守。

由實驗結果顯示，當曝火面第 1 層在燃燒時，撓度會隨著時間的變化呈現線

性的增長，然而撓曲變形公式求得之撓度則會與時間呈一曲線關係，並與 $1/EI_{eff}$ 成正比，此外，當曝火面第1層完全炭化後並燃燒至曝火面第2層時，實驗數據顯示其撓度仍會隨著時間增加而變大，與理論所推得的結果不同，推測可能是因CLT板同層各集成元間並沒有進行膠合，故在燃燒時，集成元間會因為受載重的影響產生縫隙，使得火焰經由縫隙對上層集成元進行燃燒，導致整體碳化不均勻，使得理論值與實驗結果有明顯誤差。

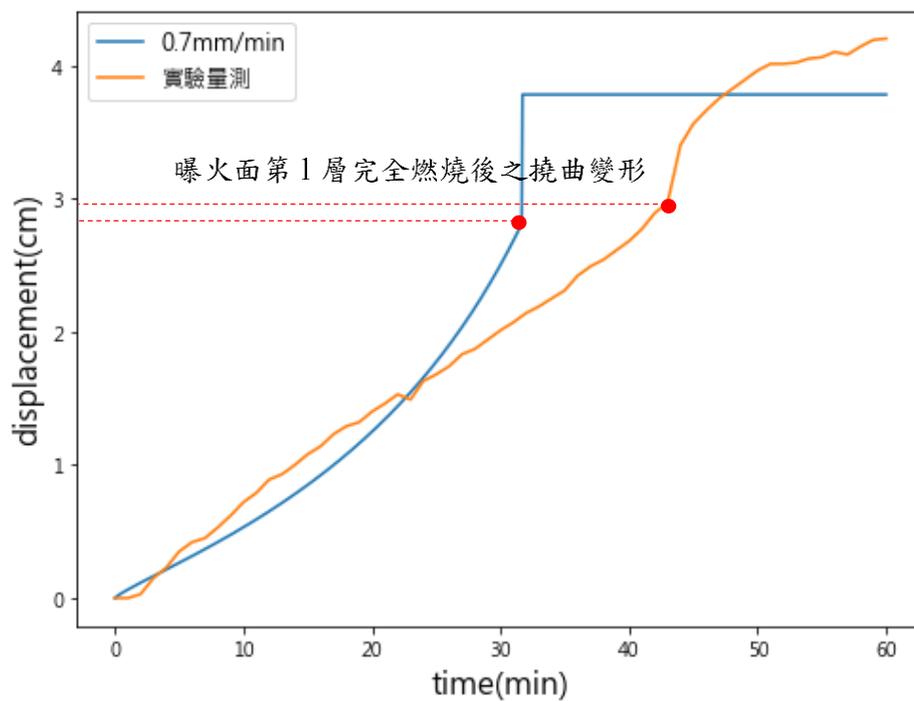


圖4-31 日本扁柏 CLT 理論與實驗撓曲變形之歷時比較

第五節 不同材種及集成元厚度 CLT 樓板之撓曲變形

本研究亦彙整國內廠商委託建研所防火實驗室，所進行的直交集成板CLT之1小時防火實驗成果，共計有歐洲雲杉12.5cmCLT，以及日本扁柏12cmCLT兩組試體。實驗方法均採CNS12514-5/A3305-5「建築物構造構件耐火試驗法-第5部:承重水平區劃構件特定要求」，進行CLT樓板之實驗。CLT樓板單片尺寸為160x440cm，第1,3,5層屬於強軸方向，並將兩片160x440cm之CLT試體利用“single internal spline”的拼接方式進行拼接，裁切加工後符合試體框架尺寸(303x432cm)並進行實驗。

其中，材料規格方面，歐洲雲杉CLT試體符合ISO 16696-1標準，日本扁柏CLT試體符合JAS標準。實驗試體於ISO834-1之燃燒曲線下進行1小時的火害實驗，並於樓板上加載 300kgf/m^2 之載重，實驗完成針對樓板撓曲變形進行檢核，並確認樓板之最大撓曲變形不超過最大容許撓曲變形之規定($D=L^2/400d$)。

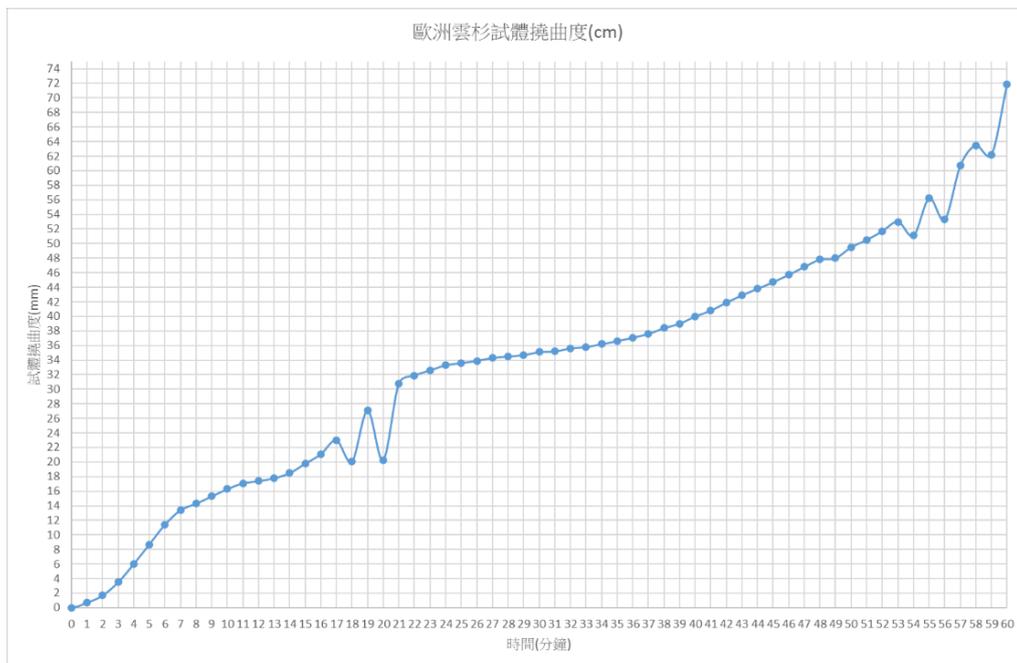


圖 4-34. 歐洲雲杉 12.5cmCLT 在 1 小時火害實驗下之撓曲變形



圖 4-35.日本扁柏 12cmCLT 在 1 小時火害實驗下之撓曲變形

第五章 規範修正建議

第一節 實驗結果討論

本研究考量國內目前木構造建築限高 4 層樓，防火結構物之主要樓板及承重牆防火時效為 1 小時的情況下，因此針對直交集成板 CLT 在 1 小時的火害下進行其炭化深度及火害行為之研究。主要透過進行 2 組 CLT 樓板及 1 組 CLT 牆板之火害實驗，分別為 5 層 15cm 之日本扁柏直交集成板 CLT、5 層 17.5cm 之北美花旗松直交集成板 CLT，以及 5 層 18cm 之國產柳杉直交集成板 CLT 牆板，做為 CLT 構造專章內容之建議依據及炭化層深度之驗證。

5.1.1 實驗結果討論

由實驗結果可發現試體中央位置之測溫點，在不同深度測溫計之溫升曲線中，日本扁柏 CLT 之曝火面最底層測溫線大約在 18 分鐘左右有較明顯的升溫趨勢，顯示此時測溫計已經受到火爐溫度之影響，概算炭化速率約為 0.8mm/min；而北美花旗松 CLT 之曝火面最底層測溫線大約在 22 分鐘左右有較明顯的升溫趨勢，概算炭化速率約為 0.68mm/min。另外，根據整體實驗結果，日本扁柏 CLT 樓板及北美花旗松 CLT 樓板之曝火面第 2 層均無明顯升溫現象，顯示火害所造成炭化層並未完全燒盡曝火面第 2 層。兩組樓板 CLT 之炭化深度經量測觀察，分別都可發現在 CLT 板搭接處有較大的炭化深度產生。由於搭接處無法如同板本身緊密接合，因此會有火源竄入並造成較深的炭化層。國產柳杉 CLT 牆板由於無樓板般較大之撓曲變形產生，搭接處並沒有無法密合之影響，因此搭接及非搭接部分之炭化深度無明顯差異。整體而言，三組試體的炭化深度可整理如下：

- (1) 日本扁柏 CLT 樓板非搭接部分的炭化深度約介於 4.4cm~5.1cm 左右，平

均炭化速率介 0.73~0.84mm/min。略高於日本國土交通省建議的炭化速率值(制式工法建議炭化深度值為 4.5cm)。

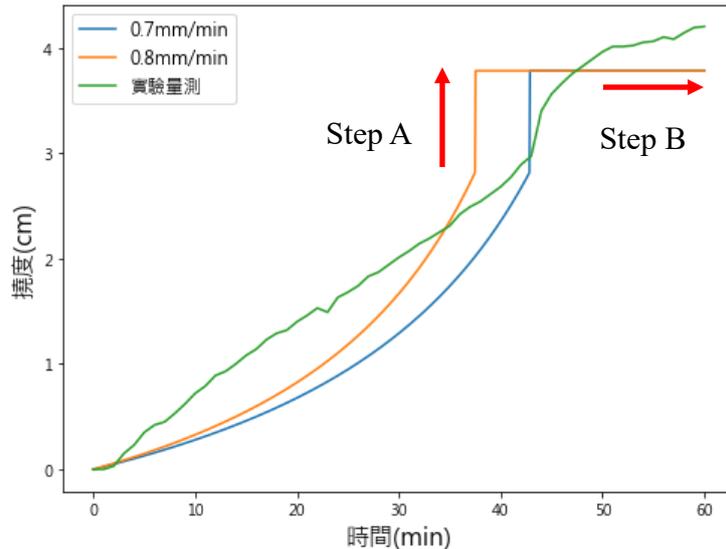
- (2) 北美花旗松 CLT 樓板非搭接部分的炭化深度約介於 4.1cm~4.9cm 左右，平均炭化速率介 0.68~0.82mm/min。與北美 CLT Handbook(參考 NDS 之數據)中建議的平均炭化速率 0.76 mm/min 相近。
- (3) 國產柳杉 CLT 牆板於搭接及非搭接部分之炭化深度無明顯差異，平均炭化深度約為 4.1cm~5.1cm 左右。平均炭化速率介 0.68~0.85mm/min。較現行規範表 9.3-1 之值底部炭化深度 4.68cm 為大。

另外，本研究亦參考國外規範，進行火害時由於炭化層產生，導致整體強度下降，以致整體撓度會有持續加大的評估方法進行探討。由評估結果可顯示，當曝火面第 1 層完全炭化，底層主軸由曝火面第 1 層集成元的強軸變為曝火面第 2 層集成元的弱軸，因此造成撓度大幅度的增加。此外，當曝火面第 1 層(強軸)完全炭化後，並燃燒至曝火面第 2 層(弱軸)時，實驗數據顯示其撓度會突然增大，與理論所推得的結果相同(圖 5-1 Step A)，原因為弱軸不提供強度導致整體樓板等值 EI 值下降而變形遽增。另外，由於弱軸不提供強度，理論上通過急遽變形階段時，由於強軸層(曝火面第 3 層)受到弱軸層(曝火面第 2 層)保護，因此整體等值 EI 值維持固定的情況下，撓曲變形應為一固定值(圖 5-1 Step B)。然而，CLT 板同層各集成元間並沒有進行膠合，故在燃燒時，集成元間會因為受載重的影響產生縫隙，使得火焰經由縫隙對上層集成元進行燃燒，導致整體炭化不均勻並使得強軸集成元(曝火面第 3 層)受到火害的影響，使得理論值與實驗結果稍有不同。針對此現象本研究提出以下建議：

- (1) CLT 樓板由於集成元組成方式與 GLT 不同，在強軸集成元完全燃燒後會有強度銳減之現象，原因在於弱軸集成元僅提供炭化保護功能而不提供強度，所以僅用炭化深度來決定構件是否可以承受預定載重的方式較不

恰當。

- (2) 因此本研究建議，將本研究進行實驗之試體(集成元層數、厚度固定)定義為制式工法，未來使用相同類型之 CLT 板進行設計時，可依本研究提供之炭化深度進行設計。若為不同規格之 CLT 板，則在可確認其炭化速率的條件下，進行本研究提供之殘餘強度評估公式進行檢證。



Step A: 弱軸不提供強度導致整體樓板等值 EI 值下降而變形遽增

Step B: 強軸層受到保護因此整體強度維持固定的情況下，撓曲變形應為一固定值

圖5-1 理論與實驗撓曲變形之歷時比較

5.1.2 實驗結果之限制條件

本研究針對三組直交集成板 CLT(5 層 15cm 之日本扁柏直交集成板 CLT、5 層 17.5cm 之北美花旗松直交集成板 CLT, 以及 5 層 18cm 之國產柳杉直交集成板 CLT 牆板)進行 1 小時火害實驗，實驗結果與國外文獻結果差異不大，但後續應增加實驗樣本數以達到實驗結果的可信度。另外，本實驗僅使用特定材種及膠合種類，後續亦應針對不同材種及不同膠合劑之影響進行實驗及研究。在本研究提出的板與板之間的搭接層，因為接合的關係造成火焰竄入的行為，為 CLT 樓板設計之重要因素，亦應針對此現象進行深入探討及研究。

第二節 規範修訂建議

5.2.1 規範修訂建議

根據文獻回顧及初步實驗結果，本研究參考現行木構造建築設計及施工規範，研提未來針對直交集成板 CLT 在防火設計上的修訂方向及建議。

(1) 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，「9.3 木構造防火設計」定義木構造分為梁柱構件、框組壁式、以及原木層疊三類，建議增訂直交集成板 CLT。

(2) 直交集成板 CLT 之防火設計增訂建議如下：

(a) 構材之最小斷面應依防火時效設計，於時效內燃燒之殘餘強軸集成元斷面須符合結構設計承載能力所需之最小強軸集成元之斷面尺寸。

(b) 不同材種直交集成板之燃燒炭化速率依表 9.3-2 計算。經中央主管機關認可者得依認可之炭化深度辦理。

(c) 接合部之金屬扣件應使用適當之防火被覆材，或將金屬扣件設置於規定防火時效之安全斷面內，以確保接合部之強度。

(3) 表 9.3-2 之增訂建議如下：

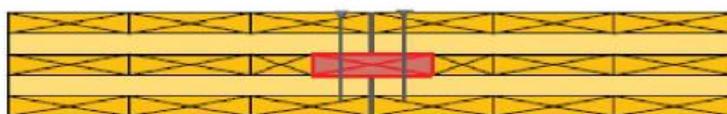
本研究中所進行的日本扁柏 CLT 樓板、北美花旗松 CLT 樓板，以及國產柳杉 CLT 牆板實驗，1 小時火害後之炭化深度值整理如下，其中 CLT 樓板由於於搭接處及非搭接處有較大之炭化深度差異，因此分類整理，CLT 牆板則在搭接及非搭接處則無明顯差異。此表格亦彙整 12cm 日本扁柏 CLT 樓板及 12.5cm 歐洲雲杉 CLT 樓板之實驗結果，然而此兩樓板並無進行炭化深度之量測，僅針對樓板撓曲變形進行檢核，並確認小於最大容許撓曲變形規定 ($D=L^2/400d$)。

表5-1 規範表 9.3-2 適用 1 小時防火設計之直交集成板 CLT

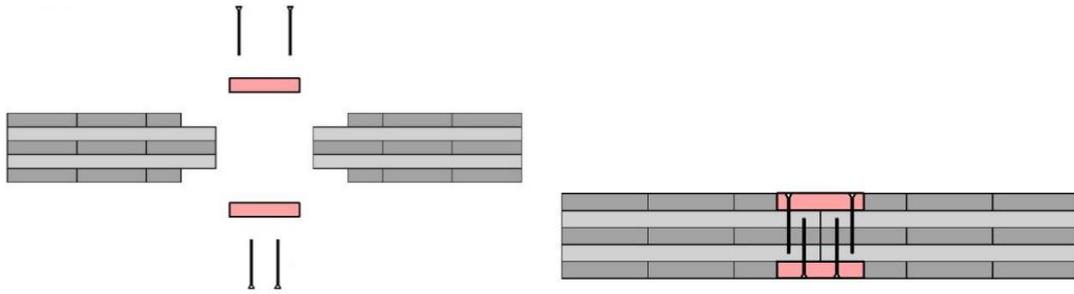
材種		1/2/3/4/5層 集成元厚度(cm)	CLT板 厚度(cm)	適用結構體	
				樓板	牆板
1	國產柳杉	3.6/3.6/3.6/3.6/3.6	15.0	-	適用
2	花旗松	3.5/3.5/3.5/3.5/3.5	12.0	適用	-
3	日本扁柏	3.0/3.0/3.0/3.0/3.0	17.5	適用	-
		2.4/2.4/2.4/2.4/2.4	12.5	適用	-
4	歐洲雲杉	1.9/3.4/1.9/3.4/1.9	18.0	適用	-

解說:

1. 實驗方法採CNS12514-4/A3305-4「建築物構造構件耐火試驗法-第4部:承重垂直區劃構件特定要求」,以及CNS12514-5/A3305-5「建築物構造構件耐火試驗法-第5部:承重水平區劃構件特定要求」,進行CLT牆板及樓板之實驗。
2. 實驗用直交集成板CLT採用我國於108年11月14日公布國家標準CNS16114之定義。然而CNS16114內文中針對直交集成板作為結構用途則另有規定,即「若要做為建築結構用途,則可參考ISO 16696-1並應依建築主管機關法規規定。」
3. 本實驗之CLT樓板單片尺寸為160x440cm,第1,3,5層屬於強軸方向,並將兩片160x440cm之CLT試體利用“single internal spline”的拼接方式進行拼接,裁切加工後符合試體框架尺寸(303x432cm)並進行實驗。
4. 國產柳杉承重牆板材尺寸約為300x300cm,第1,3,5層屬於強軸方向,利用“double internal spline”的拼接方式進行拼接,裁切加工後符合試體框架尺寸並進行實驗。



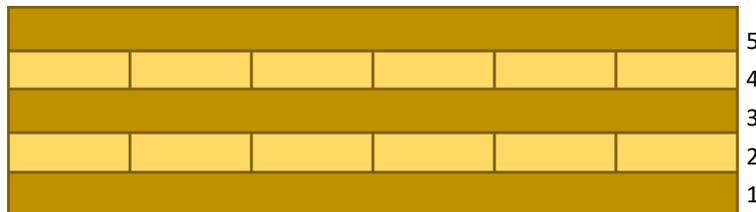
(a) single internal spline



(b) Double Surface Splines

5. 直交集成板之集成元厚度依各國標準及用途不同亦有差異，本實驗用之集成元厚度參考各國常用尺寸，採用之試體尺寸整理如下。另外，關於直交集成板CLT之規格方面，日本扁柏CLT符合日本JAS標準，花旗松CLT符合ISO 16696-1標準並由APA檢驗合格，歐洲雲杉CLT符合ISO 16696-1標準，國產柳杉符合CNS16114標準。集成元及CLT板之尺寸許可差參考”CNS16114 表1.尺度許可差”之規定。

材種		1/2/3/4/5層 集成元厚度(cm)	CLT板 厚度(cm)	資料 來源
1	日本扁柏	3/3/3/3/3	15.0	本研究
		2.4/2.4/2.4/2.4/2.4	12.0	A廠
2	花旗松	3.5/3.5/3.5/3.5/3.5	17.5	本研究
3	歐洲雲杉	1.9/3.4/1.9/3.4/1.9	12.5	B廠
4	國產柳杉	3.6/3.6/3.6/3.6/3.6	18.0	本研究



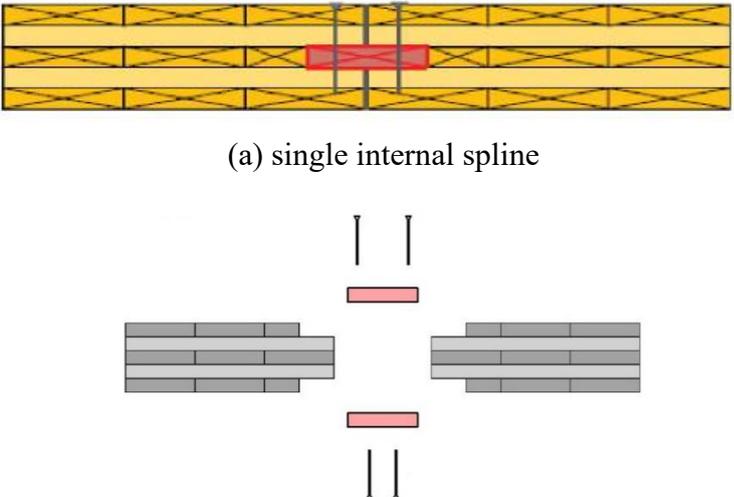
6. 實驗試體於 ISO834-1 之燃燒曲線下進行 1 小時的火害實驗，並於樓板上加載 300kgf/m²之載重，實驗完成針對樓板撓曲變形進行檢核，並確認樓板之最大撓曲變形不超過最大容許撓曲變形之規定(D=L²/400d)。

5.2.2 三段式修正建議

根據本研究之實驗及資料彙整，提出「木構造建築物設計及施工技術規範」中，針對直交集成板 CLT 之增修條文建議。

表5-2 木構造建築物設計及施工技術規範部分修正條文案草案對照表

修	正	規	定	現	行	規	定	說	明																															
9.3木構造防火設計 (5) 直交集成板CLT (a) 構材之最小斷面應依防火時效設計，於時效內燃燒之殘餘強軸集成元斷面須符合結構設計承載能力所需之最小強軸集成元之斷面尺寸。 (b) 不同材種直交集成板之燃燒炭化速率依表 9.3-2 計算。經中央主管機關認可者得依認可之炭化深度辦理。 (c) 接合部之金屬扣件應使用適當之防火被覆材，或將金屬扣件設置於規定防火時效之安全斷面內，以確保接合部之強度。				無		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，「9.3 木構造防火設計」定義木構造分為梁柱構件、框組壁式、以及原木層疊三類，建議增訂直交集成板 CLT。																																		
表 9.3-2 適用 1 小時防火設計之直交集成板 CLT <table border="1" data-bbox="105 1440 949 1901"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材種</th> <th rowspan="2">1/2/3/4/5層 集成元厚度(cm)</th> <th rowspan="2">CLT板 厚度(cm)</th> <th colspan="2">適用結構體</th> </tr> <tr> <th>樓板</th> <th>牆板</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 國產柳杉</td> <td>3.6/3.6/3.6/3.6/3.6</td> <td>15.0</td> <td>-</td> <td>適用</td> </tr> <tr> <td>2 花旗松</td> <td>3.5/3.5/3.5/3.5/3.5</td> <td>12.0</td> <td>適用</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">3 日本扁柏</td> <td>3.0/3.0/3.0/3.0/3.0</td> <td>17.5</td> <td>適用</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>2.4/2.4/2.4/2.4/2.4</td> <td>12.5</td> <td>適用</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>4 歐洲雲杉</td> <td>1.9/3.4/1.9/3.4/1.9</td> <td>18.0</td> <td>適用</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> 解說：				材種	1/2/3/4/5層 集成元厚度(cm)	CLT板 厚度(cm)	適用結構體		樓板	牆板	1 國產柳杉	3.6/3.6/3.6/3.6/3.6	15.0	-	適用	2 花旗松	3.5/3.5/3.5/3.5/3.5	12.0	適用	-	3 日本扁柏	3.0/3.0/3.0/3.0/3.0	17.5	適用	-	2.4/2.4/2.4/2.4/2.4	12.5	適用	-	4 歐洲雲杉	1.9/3.4/1.9/3.4/1.9	18.0	適用	-	無		表 9.3-2 之增修建議主要為本研究所通過 1 小時火害實驗之試體，包含日本扁柏 CLT 樓板、北美花旗松 CLT 樓板，以及國產柳杉 CLT 牆板			
材種	1/2/3/4/5層 集成元厚度(cm)	CLT板 厚度(cm)	適用結構體																																					
			樓板	牆板																																				
1 國產柳杉	3.6/3.6/3.6/3.6/3.6	15.0	-	適用																																				
2 花旗松	3.5/3.5/3.5/3.5/3.5	12.0	適用	-																																				
3 日本扁柏	3.0/3.0/3.0/3.0/3.0	17.5	適用	-																																				
	2.4/2.4/2.4/2.4/2.4	12.5	適用	-																																				
4 歐洲雲杉	1.9/3.4/1.9/3.4/1.9	18.0	適用	-																																				

修 正	規 定	現 行 規 定	說 明
	<p>1. 實驗方法採CNS12514-4/A3305-4「建築物構造構件耐火試驗法-第4部:承重 垂直區劃構件特定要求」, 以及CNS12514-5/A3305-5「建築物構造構件耐火試驗法-第5部:承重水平區劃構件特定要求」, 進行CLT牆板及樓板之實驗。</p> <p>2. 實驗用直交集成板CLT採用我國於108年11月14日公布國家標準CNS16114之定義。然而CNS16114內文中針對直交集成板作為結構用途則另有規定, 即「若要做為建築結構用途, 則可參考ISO 16696-1並應依建築主管機關法規規定。」</p> <p>3. 本實驗之CLT樓板單片尺寸為160x440cm, 第1,3,5層屬於強軸方向, 並將兩片160x440cm之CLT試體利用“single internal spline”的拼接方式進行拼接, 裁切加工後符合試體框架尺寸(303x432cm)並進行實驗。</p> <p>4. 國產柳杉承重牆板材尺寸約為300x300cm, 第1,3,5層屬於強軸方向, 利用“double internal spline”的拼接方式進行拼接, 裁切加工後符合試體框架尺寸並進行實驗。</p>		<p>實驗。此表格亦彙整由業界廠商委託建研所防火實驗室所進行的12cm 日本扁柏CLT 樓板及12.5cm 歐洲雲杉CLT樓板之實驗結果, 並針對樓板撓曲變形進行檢核, 確認樓板最大變形不超過最大容許撓曲變形規定($D=L^2/400d$)。</p>
	 <p>(a) single internal spline</p>		

修	正 規 定	現 行 規 定	說 明
	<div data-bbox="292 264 810 353" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="379 398 730 432">(b) Double Surface Splines</p> <p data-bbox="108 465 986 936">5. 直交集成板之集成元厚度依各國標準及用途不同亦有差異，本實驗用之集成元厚度參考各國常用尺寸，採用之試體尺寸整理如下。另外，關於直交集成板 CLT 之規格方面，日本扁柏 CLT 符合日本 JAS 標準，花旗松 CLT 符合 ISO 16696-1 標準並由 APA 檢驗合格，歐洲雲杉 CLT 符合 ISO 16696-1 標準，國產柳杉符合 CNS16114 標準。集成元及 CLT 板之尺寸許可差參考”CNS16114 表 1.尺度許可差”之規定。</p> <div data-bbox="215 981 901 1171" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="108 1261 986 1507">6. 實驗試體於 ISO834-1 之燃燒曲線下進行 1 小時的火害實驗，並於樓板上加載 300kgf/m²之載重，實驗完成針對樓板撓曲變形進行檢核，並確認樓板之最大撓曲變形不超過最大容許撓曲變形之規定(D=L²/400d)。</p>		

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究考量國內目前木構造建築限高 4 層樓，防火結構物之主要樓板及承重牆防火時效為 1 小時的情況下，因此針對直交集成板 CLT 在 1 小時的火害下進行其炭化深度及火害行為之研究。主要透過進行 2 組 CLT 樓板及 1 組 CLT 牆板之火害實驗，分別為 5 層 15cm 之日本扁柏直交集成板 CLT、5 層 17.5cm 之北美花旗松直交集成板 CLT，以及 5 層 18cm 之國產柳杉直交集成板 CLT 牆板，做為 CLT 構造專章內容之建議依據及炭化層深度之驗證。主要研究成果及結論如下：

- 一、 實驗之主要發現為，由於樓板試體係由拼接而成，因此炭化層之最大深度發生在兩塊 CLT 板接合處，判斷由於搭接處並無法如同板本身緊密接合，因此會有火源竄入並造成炭化層較其他區域為大之情形。
- 二、 各個不同材料之炭化深度方面，日本扁柏 CLT 樓板非搭接部分的炭化深度約介於 4.4cm~5.1cm 左右，平均炭化速率介 0.73~0.84mm/min。略高於日本國土交通省建議的炭化速率值(制式工法建議炭化深度值為 4.5cm)。北美花旗松 CLT 樓板非搭接部分的炭化深度約介於 4.1cm~4.9cm 左右，平均炭化速率介 0.68~0.82mm/min。與北美 CLT Handbook(參考 NDS 之數據)中建議的平均炭化速率 0.76 mm/min 相近。國產柳杉 CLT 牆板於搭接及非搭接部分之炭化深度無明顯差異，平均炭化深度約為 4.1cm~5.1cm 左右。平均炭化速率介 0.68~0.85mm/min。較現行規範表 9.3-1 之值底部炭化深度 4.68cm 為大。
- 三、 CLT 樓板由於集成元組成方式與 GLT 不同，在強軸集成元完全燃燒後

會有強度銳減之現象，原因在於弱軸集成元僅提供炭化保護功能而不提供強度，所以僅用炭化深度來決定構件是否可以承受預定載重的方式較不恰當。因此本研究建議，將本研究進行實驗之試體(集成元層數、厚度固定)定義為制式工法，未來使用相同類型之 CLT 板進行設計時，可依本研究提供之炭化深度進行設計。若為不同規格之 CLT 板，則在可確認其炭化速率的條件下，進行本研究提供之殘餘強度評估公式進行檢證。

第二節 建議

建議一

研擬「木構造建築物設計及施工技術規範」第九章直交集成板 CLT 之增修條文：立即可行建議。

主辦機關：所內政部營建署

協辦機關：內政部建築研究所

根據本年度所完成的實驗成果及數據，建議研擬「木構造建築物設計及施工技術規範」第九章中，針對直交集成板 CLT 之增修條文建議。

建議二

彙整直交集成板 CLT 之防火設計原則出版解說手冊：中長期建議。

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人台灣建築中心

建議內政部建研所可以本年度實驗及資料彙整成果為基礎，針對直交集成板 CLT 之防火設計原則出版解說手冊。

參考文獻

- [1] 內政部，「木構造建築物設計及施工技術規範」，民國 100 年。
- [2] 木質構造設計規準·同解說,日本建築學會,2006
- [3] 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
- [4] 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
- [5] CLT 関連告示等解説書, 日本住宅・木材技術センター, 2016
- [6] CLT Handbook (USA Edition), FPInnovations, 2013
- [7] ANSI/APA PRG 320, Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber, 2019
- [8] ISO-16696-1, Timber structure-Cross laminated timber, First edition, 2019
- [9] Birgit O`stman, Joachim Schmid, Michael Klippel, Alar Just, Norman Werther, Daniel Brandon, FIRE DESIGN OF CLT IN EUROPE, Wood and Fiber Science, 50(Special Issue), pp. 68-82, 2018
- [10] Trong Tuan TRAN, Mourad KHELIFA, Ali NADJAI, Marc OUDJENE, Yann ROGAUME, Modelling of fire performance of Cross Laminated Timber (CLT) panels, Journal of Physics: Conf. Series 1107, 032002, 2018
- [11] EN 16351:2015 Timber structures-Cross laminated timber. Requirements, 2015
- [12] Lineham, S. A., D. Thomson, A. I. Bartlett, L. A. Bisby, and R. M. Hadden, Structural response of fire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads. Fire Safety Journal. 85:23-34, 2016
- [13] Wiesner, F., F. Randmael, W. Wan, L. Bisby, and R. M. Hadden, Structural response of cross-laminated timber compression elements exposed to fire. Advances in Structural Engineering. 23:22-36, 2017
- [14] Wang, Y. X. , J. Zhang, F. Mei, J. N. Liao, and W. B. Li, Experimental and numerical analysis on fire behaviour of loaded cross-laminated timber panels. Fire Safety Journal. 91:56-67, 2019

- [15] Emberley, R., T. Do, J. Yim, and J. L. Torero, Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber. *Fire Safety Journal*. 91:252-258, 2017
- [16] Zelinka, S. L., K. Sullivan, S. Pei, N. Ottum, N. J. Bechle, R. Douglas R., and L. E. Hasburgh, Small scale tests on the performance of adhesives used in cross laminated timber (CLT) at elevated temperatures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 95:102436, 2019
- [17] Klippel, M., and J. Schmid, Design of cross-laminated timber in fire. *Structural Engineering International* 27:224-230, 2017

附錄一 期初、期中及期末審查會議記錄

內政部建築研究所

辦理「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發整合應用計畫(二)協同研究計畫」遴選協同研究人員第 2 案
「直交集成板(CLT)構造防火設計之研究」

廠商回應一覽表

項次	評選委員意見	廠商回應
1	依研究步驟，規劃做 CLT 樓板及牆板之防火實驗，倘若屬於建築法主要構造，則為技規 69 條防火時效之實驗(如目前研究安排)；倘若為裝修材料，則為技規第 88 條應做耐燃實驗。因此，宜評估 CLT 牆作為承重牆之使用性質，決定應做防火時效或裝修材料之防火實驗安排。(請廠商參考)。	本研究針對目前建築技術規則構造編第 171 條，木構造建築的樓高限制在 4 層樓之規定，並參考建築技術規則建築設計施工編 70 條，樓高對於各結構單元的防火性能之限制。擬定以 CLT 作為樓板/牆板等結構單元時之防火 1 小時性能實驗，作為本次研究之重點。
2	CLT 支柱梁主要構造之既有研究宜納入文獻。(請廠商加強)。	CLT 在國際間主要作為板結構單元使用，少部分國家有作為梁柱使用的狀況，後續將補充此部分相關文獻與資料。然本研究主要以 CLT 作為板結構之防火性能之目標進行實驗及研究。
3	團隊在建築法規領域較不足之處，可以利用專家顧問方式補足，以利用研究成果與建研所提出法規案之政策銜接。(請廠商參考)。	建築法規領域預計透過專家座談會的方式進行深入探討。

4	<p>本次實驗可使用材料包括進口材及國產材，建請評估運用國產本土材料之可行性。</p>	<p>國產材由於目前還無規格化之製作流程及產品，因此規劃以結構行為較單純之牆板進行防火實驗，並與國際間之實驗及研究數據做比較。</p>
5	<p>請說明 CLT 做為構造材及裝修材之差異性？</p>	<p>CLT 在國際間主要作為結構單元使用，主要檢討其防火時效。雖有部分國家如日本，將較薄之 CLT 版作為裝修材使用(以耐燃性能認定)，然本研究主要以 CLT 作為防火結構之目標進行實驗及研究。</p>
6	<p>建請具體納入適用國內法規之施工法。</p>	<p>適用國內法規之施工法，預計於執行期間提出建議。</p>
7	<p>防火試驗 CLT 有採用進口材及國產材二種，而在研究步驟中顯示，國產 CLT 用於牆板防火試驗，而進口 CLT 則用於樓板之防火試驗，請說明其用意為何？</p>	<p>本研究之實驗規劃進行 2 組樓板試驗及 1 組牆板實驗，有鑑於國際間 CLT 之產品已經規格化，因此結構行為上較複雜之樓板實驗主要以國外進口材進行實驗。國產材由於目前還無規格化之製作流程及產品，因此規劃以結構行為較單純之牆板進行防火實驗，並與國際間之實驗及研究數據做比較。</p>
8	<p>請就建築法規修正而言，預計修正之方向簡要說明， (1)防火因素會部會影響樓高限</p>	<p>本研究針對目前建築技術規則構造編第 171 條，木構造建築的樓高限制在 4 層樓之規定，並參考</p>

	<p>制？</p> <p>(2)就日本經驗而言，震災都市大火是導致人員罹難最重大原因，若以 CLT 建構高層大規模建築，在法規上是否要有在地條件之限制。</p>	<p>建築技術規則建築設計施工編 70 條，樓高對於各結構單元的防火性能之限制。擬定以 CLT 作為樓板/牆板等結構單元時之防火 1 小時性能實驗，作為本次研究之重點。</p>
9	<p>目前防火時效是針對結構安全及消防救助安全所考量，可否就國外 CLT 之耐燃性及可能產生濃煙對逃生避難之影響相關規定蒐集比較。</p>	<p>CLT 主要作為防火結構使用，耐燃性能主要透過外部包覆的耐燃材提供。後續執行過程預計蒐集國外 CLT 防火性能、耐燃性及可能產生濃煙對逃生避難之相關研究及文獻進行補充。</p>
10	<p>國外都市防火結構及內裝規範請加強說明。另有關本研究範圍及限制亦請明確述明，以免被誤用。</p>	<p>後續會在執行期間補充本研究範圍及限制。</p>

期中審查意見及回覆

姓名	審查意見	意見回覆
李明智 委員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 肯定木構造更廣泛運用有其重要必要性。 2. 炭化程度現行建築法規之防火時效或耐燃等級之連結說明。 3. 建議在文獻研究針對世界各不同規範列表小結、列表結構行為各參數比較。 4. 試體載重試驗方法依據說補充或與其他各國測試方法異同。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 本研究主要針對直交集成版 CLT 作為防火結構用途時，探討其 1 小時火害實驗後之基本性能。並不探討材料之發煙或發熱等室內耐燃等級評定之相關研究。 3. 感謝委員意見，遵照辦理。 4. 感謝委員意見，遵照辦理。
陳啟仁 委員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依技術規則 171-1 條，木構造非供居住使用者有可能超過 4 層樓，簷高 14 米之木構造建築與國際間 CLT 發展趨勢契合，故建議本研究方向可朝大於等於 2 小時防火時效推進。 2. 國內業者亦已有通過防火驗證，本計畫是否可列入討論(徵詢業者許可?)尤其是燃燒炭化速率部分。 3. 加載樓板中央最大撓曲位置似乎亦為接續點之位置，是否會有影響加載燃燒之行為。 4. 預期成果建議未來於施工設計技術規範中提出明確之建議及 CLT 的專章。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，由於本研究目前規劃內容以現行規範四層樓高為架構進行，因此主要以 1 小時防火時效為主。 2. 國內業者已通過防火驗證之資料，本研究會以資料彙整之方式於報告中呈現，並納入未來規範修訂建議中。 3. 由於實驗用樓板為兩片直交集成板拼接而成，中央之接合部剛好為兩片板之續接面，對於板結構之最大撓曲變形是否有特別之影響，建議後續透過有無續接面下撓曲變形之比較，探討接續面對最大撓曲變形之影響。 4. 感謝委員意見，遵照辦理。

<p>江支川 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. CLT 主要將應用在建築物的何種部位? 2. 台灣木構造並不普及，人為縱火時，CLT 是否會更不安全? 3. 大跨距的主體結構，可將用 CLT 嗎? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 直交集成板 CLT 依其膠合集成元厚度及層數來決定主體結構之跨距大小，主要用於板牆等結構部位。 2. 防火安全建立在對於主要結構體的保護機制中，本研究之主要目的即為確立 CLT 板在 1 小時火害下的炭化層保護機制及行為，以確保結構之安全性無虞。 3. 大多數在國外之大跨距 CLT 案例均會搭配其他材料，如鋼結構，設計成如張弦梁等系統來達到大跨距的空間需求。
<p>郭詩毅 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 期中報告請先加目錄(含圖、表目錄)，期初及專家審查意見與答覆。內文中，單位的標示再檢視。如°C等。 2. 表 6，五層 15cm 日本扁柏 CLT 之材料基本性質是廠商提供或是本研究實驗所得之結果? 本研究應針對這些基本數據做了解尤其是含水率、抗彎強度等。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，遵照辦理。 2. 本研究針對各實驗試體之基本數據均會進行實驗並取得。
<p>陳正平 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. P.13 柱 4 公尺可加載 2000 噸；梁 8 公尺集中加載 100 噸；均佈加載 200 噸；樓板 4*8 公尺加載 70~100 公斤/平方公尺。等語似不合理。 2. 接續是否設置在平行受力方向? 3. P.2 直交集成板 CLT 於 1 小時火害實驗後之強度評估是否用來決定防火時效? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，本段文字將進行修正。 2. 續接主要參考國外主流作法，接續在平行受力方向可待後續研究進行可行性評估。 3. 本研究之強度評估旨在提供 1 小時火害後直交集成板 CLT 之殘餘強度。對於相同厚度下通過 1 小時火害試驗之 CLT 板，未來是

		否可以承受 2 小時的火害需求，亦可透過本評估方法，首先扣除 2 小時的炭化深度後，進行殘餘斷面之強度評估來確定其性能。
林克強 委員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究欲在”木構造建築設計及施工技術規範”中增訂直交集成板(CLT)構造防火設計規定，則是否先定義 CLT 板為何(構造)? 2. 若欲訂定 CLT 板構造防火設計規定，建議先參考國外相關設計文件之規定，但本期中報告中有關國外相關規定的文獻收集較為薄弱。 3. 炭化深度為本研究重要參考數，請因此應詳細敘述定義，並如何量測與評估。 4. 火害前的強度是否應進行測試做為比對參考依據? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，遵照辦理。 2. 感謝委員意見，遵照辦理。 3. 本研究中之炭化深度量測主要透過刮除炭化層，以及炭化層及未受燃燒木材間之受熱層厚，進而量得殘餘之木材斷面積，期末報告中將補充本部分之量測過程。 4. 此部分強度需求將視研究結果需求進行補充。
雷明遠 委員	<p>美國 IBC 即將於 2021 年允許 Mass Timber 構造用於 18 層建築物，惟國內建築技術規則對木構造建築限高為 4 層，其主要構造防火時效為 1 小時，而本研究亦以 1 小時防火時效構造為主，因應國際法規趨勢，建議請參考美國、日本等國法規進行文獻比較，並提出建築技術規則修正建議。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見，遵照辦理。

期末審查意見及回覆

委員	審查意見	綜合回覆
林自勤 委員	集成版膠結材料與膠結處理是否影響火害炭化程度與強度?若本研究僅針對某一種膠結處理方式，則請說明清楚。	感謝委員意見。本研究實驗樣本有限，因此採膠合層數及膠合種類固定之 CLT，減少實驗變數。
江支川 委員	<p>1. CLT 在火害下，表面形成炭化，自然抗壓抗彎距等能力下降，如做為結構材(梁構建時)，斷面尺寸最少應有多少才具有防火的功效?</p> <p>2. CLT 在接合部位，建議使用金屬扣件(P50)，但要有防火被覆材的說明。能否追加斷面詳圖，讓建築設計有所參考。</p> <p>3. CLT 如應用在結構柱時，有何限制(例如最小尺寸等等)。</p>	<p>1. 感謝委員意見。結構承載之基本斷面需求將透過本研究提出建議值。</p> <p>2. 感謝委員意見。接合部之設計方法將於後續研究中建議執行。</p> <p>3. 感謝委員意見。CLT 主要作為板結構，較不適用於梁柱結構系統，另外本研究並無探討接合部在火害下的影響，僅初步針對不同材種不同厚度在 1 小時火害下之影響，進行探討。</p>
孫立言 委員	<p>1. 第 2 章文獻之敘述方式，請於本文中載明文獻出處。</p> <p>2. P.12 圖二實驗試體圖示，無法了解表達意圖(中心每 30cm 裁切未在圖上表示)。</p>	<p>1. 感謝委員意見。本研究內容會根據委員建議進行修正。</p> <p>2. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>3. 感謝委員意見，遵照</p>

	<p>3. CNS12514 已廢止，請更正標準總號。</p> <p>4. 試體 3 組為不同構造部位，不同材種，請補充理由。</p> <p>5. 第 5 章結論</p> <p>(1)表 9、3-2 建議內容中(a)CNS 12514 請更新。</p> <p>(2) (b)所述內容非直交集成板之定義。</p> <p>(3) (c)是否會適用於所有表 9、3-2 之試驗?如否，請刪除。</p> <p>(4)表格內無實驗數據之材種請刪除待日後有建議數據時再增訂。</p> <p>(5) 2 欄均為「牆板」是否有誤?</p> <p>(6)表 9、3-2 之使用限制應清楚載明。</p>	<p>辦理。</p> <p>4. 樓板實驗試體材料之規劃主要選取北美及日本常用之材種進行加工製作，以符合未來應用之廣泛性及適用性。另外，本實驗亦規畫使用國產柳杉所加工製作的直交集成板 CLT 來進行實驗，然而考量目前國內直交集成板 CLT 之加工無法達到樓板火害實驗爐之尺寸大小，因此本研究規劃以國產柳杉直交集成板 CLT 牆板來進行實驗，作為驗證國產柳杉之 1 小時防火性能之用。</p> <p>5. 感謝委員意見，遵照辦理。</p>
<p>方一匡 委員</p>	<p>1. 摘要內有許多錯字，標點誤用(第一段)，建議請再加檢視修正，有關搭建處的炭化深度，建請補足，以供對照非搭接處的試驗值。</p> <p>2. 建請再試驗製作(第三章)說明中，補註明本研究試體製作是否符合國外相關施工規定(摘要的倒數</p>	<p>1. 感謝委員意見。本研究內容會根據委員建議進行修正。</p> <p>2. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>3. 感謝委員意見，遵照辦理。</p>

	<p>第 2 段)。</p> <p>3. 本研究的主要目的之一為蒐集歐洲、北美，日本等地的 CLT 防火法規與規範，建請彙整與本研究相關之規定，以供業界參考。</p>	
<p>陳啟仁 委員</p>	<p>1. 建議本研究成果討論外，可補充本研究方向之未來規劃建議之實驗法之檢討。</p> <p>2. 建議可商請先前民間單位之燃燒實驗提供資料，與本研究成果比較，更能豐富國內之 database。</p> <p>3. 表 9、3-2 中扁柏，建議修正為”日本扁柏”，柳杉則修正為”國產柳杉”。單位則建議均標用”mm”為單位尺度。</p> <p>4. 未來是否考慮如入”歐洲雲杉”。</p>	<p>1. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>2. 感謝委員意見。本研究內容會根據委員建議進行修正。另外本研究亦諮詢過”歐洲雲杉”在建研所進行過的相關資料，會將部分成果摘錄至本研究中。</p> <p>3. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>4. 歐洲雲杉 CLT 之基本性能將參考及彙整業界資料並整合於本研究報告中。</p>
<p>郭詩毅 委員</p>	<p>1. 結論尚再撰寫中，期末報告章節第 5 章加”建議”小節。</p> <p>2. 研究中提及實驗設備校正致實驗尚有部分未能完成(尚在進行中)，此部分進度應掌握。</p>	<p>1. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>2. 感謝委員意見。本研究內容會根據委員建議進行修正。</p>

	<p>3. 撰寫報告的期中審查意見回復，如 P.57-59 部分意見回復缺。</p> <p>4. 膠合材、膠合材厚度及結合處的金屬扣件建議。</p>	<p>3. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>4. 感謝委員意見，遵照辦理。</p>
陳正平 委員	<p>1. 直交集成板火害後斷面減小，強度下降，撓度增加，火害後是否還可使用？</p> <p>2. 通常火害延時短，若低於 1 小時炭化深度是否還可依比例估計。</p> <p>3. 所謂搭接是指沿強軸板之兩側鄰接、拼接，還是強軸纖維方向的續接，請說明。</p> <p>4. P.49 頁第 16 行「搭接觸」應為「搭接處」之誤。</p>	<p>1. 火害後之使用方式可以參考國外案例進行修復後使用。</p> <p>2. 理論上透過本次實驗所得之炭化速率，可用於低於 1 小時之炭化深度估算。</p> <p>3. 感謝委員意見。「搭接處」會統一修改為「拼接處」較符合現況。</p> <p>4. 感謝委員意見，遵照辦理。</p>
藍英昭 委員	<p>1. 建議補充說明報告第 23 頁 5 層 18cm 花旗松木柳杉 CLT 材料基本性質。</p> <p>2. 建議補充說明報告第 43 頁曝火面第 1 層是否為第 5 層。</p> <p>3. 建議補充說明報告試體兩側支承形式。</p> <p>4. 建議報告第 24 頁 (a)single</p>	<p>1. 感謝委員意見。後續會參酌委員意見進行修改籍資料補充。</p> <p>2. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>3. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>4. 感謝委員意見，遵照</p>

	<p>internal spline 增補尺寸標註及軸向。</p> <p>5. 報告書第 50 頁(1)第九章建築物之防火中增補「規定」。</p> <p>6. 報告書第 51 頁，表 9、3-2 樓板炭化深度，牆板炭化深度。</p>	<p>辦理。</p> <p>4. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>5. 感謝委員意見，遵照辦理。</p> <p>6. 感謝委員意見，遵照辦理。</p>
<p>林克強 委員</p>	<p>1. 炭化速率試驗值及規定建議公式的詳細差異為何?</p> <p>2. 炭化速率與單層木材厚度是否有關?若有炭化深度如何考量?</p> <p>3. 使用炭化後之等效勁度評估強度與變位，是否與試驗值相符。</p> <p>4. 樓板與牆板之炭化深度是否有差異?若有，規範的建議應如何考量較合理?</p>	<p>1. 感謝委員意見。炭化速率試驗值之最大及最小值與規定建議公式之求得值有差異。後續將比較呈現在成果報告書中。</p> <p>2. 炭化速率與生成炭化層的厚度有關，火害開始時由於炭化層較少，因此炭化速率較高，當炭化層變厚則炭化速率則相對而言會降低。</p> <p>3. 等效勁度評估強度與變位，與試驗值略有差異，但在合理範圍內。</p> <p>4. 樓板與牆板之炭化深度理論上有差異，主要差異為牆板較不受搭接</p>

		的影響，在搭接處不會有炭化深度加大。
蔡綽芳 組長	炭化深度是否適用 CLT	感謝組長意見。炭化深度僅適用於實驗試體，由於 CLT 有明顯的強弱軸差異，因此尾經實驗驗證的試體建議進行殘餘強度評估。

附錄二 專家座談會紀錄

第 2 案「直交集成板(CLT)構造防火設計之研究」 第一次專家座談會議紀錄

專家學者	專家意見
<p>孫立言 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 比營建署提案預期的研究範圍大，樂見提供豐富的研究內容。 2. 國外文獻的探討，目前有何重要發現?尤其是 CLT 之防火弱點及各國的限制?與其他木構造工法(Glulam)的差異。 3. 如另一研究有樓層數放寬之建議，要考量超出 4 層樓是否應另有防火限制? 4. 規範內容不限美、日製材，以國內常可取得且達一定品質水準之材料(不限國產材)為準。
<p>楊正裕 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請考慮於規範中納入國外炭化深度於計算公式。 2. 為確保 CLT 材質品質、建議納入 CLT 品質符合 ISO 16696-15 之驗證要求。 3. 增例 CLT 或類似材料(如 GLT)在不曝火的狀況下(以其他防火材料包覆)的防火法規要求。
<p>蘇鴻奇 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. CLT 是屬板式構造。板片的接合即重要工法。但板片接合處常為結構弱點，因火災時也常為炭化弱點。故實驗方法擬定時是否將接合處列為要件之一。(例如樓板實驗或承重牆實驗) 2. 實驗後將炭化層，注水方式與時間是否要加以明定。 3. 建議未來研究成果有關規範的擬定時宜加入，鐵件五金的防火原則。 4. 本案實驗炭化率資料建議比對與分析討論原木構規範第九章之炭化率即有數據。

<p>陳冠帆 委員</p>	<p>一切研究目標以實務能被使用為最大目的。目前以 CLT 為材料作為與世界接軌之條件非常認同，故有以下建議：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗結果為提出火害後之最大承载力，此種數據比對的為何種設計方法?(如 ASD) 2. 防火試驗是否需考慮接合部行為? 3. 國產材的後續應用需形成一套方法。 4. 上述資訊應用外部有顯著研究，應多比較進而形成國內標準。
<p>雷明遠 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. CLT 拼接的方式，建議能夠提出規範建議，包含拼接板片尺寸(寬度)，使用膠料種類，塗佈面螺栓尺寸規格等。 2. 簡報 PPT 第 15 頁改為「溫昇量測」，另請補完撓曲變形量測位置圖。 3. 簡報 PPT 第 21 頁，埋設點顏色建議修正與後續曲線顏色一致。 4. 建議提供工程實務界易懂的設計流程、公式.....計算例等供參考範例。
<p>王鵬智 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗現場施工方式與工地施工方式應考量是否一致以符合實驗。 2. CLT 的發展在國內的方向與國外(北美、日、歐)可能不同，國內的木構造規範僅針對炭化深度，是否考量獨立一章。

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發整合應用計畫(二)

「**協同研究計畫**」

第 2 案「**直交集成板(CLT)構造防火設計之研究**」

第二次專家座談會議紀錄

專家學者	專家意見
郭耕杖 委員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗規則是否以台灣目前或未來可能使用之制式工法優先執行，以利提供 data 予業界使用。 2. 實驗之撓度-時間曲線，可提供確認「炭化速率」與「有放 EI 值」之評估方式。 3. 可依實驗結果歸納提供「制式工法」及「性能設計法」之成果。 4. 撓度是加溫後增加值或是絕對值，應再確認，及檢核是否合乎法規規範。
施忠賢 委員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 針對火害後之殘餘強度評估方法，簡報 P.35，撓度隨時間 (min) 曲線，其中炭化層產生速率 0.7~0.8mm/min 在 40min 之前可再參考其他文獻成果，再調整計算 EI eff，使實驗量測不超過預測曲線為原則。 2. 「扁柏」建議修正為「日本扁柏」建議後續研究可增加國產材之相關研究。 3. CLT 單向板厚約 18cm 是否可能再減厚。與管線建議可利用拼接縫設置，避免影響強軸強度。 4. 整體而言本研究極具實用及學術價值。
林子傑 委員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研究團隊研究方法完整，文獻回顧確實，實驗結果整理及分析詳盡。 2. 建議補充國外研究文獻如 EU5 或 CLT Handbook 之炭化速度與實驗成果比對，探討國外文獻與國內研究成果差異。
蘇鴻奇	<ol style="list-style-type: none"> 1. CLT 板的炭化率結果，應與 CLT 牆的炭化率結果，應分別

委員	<p>列表，不宜混用。</p> <ol style="list-style-type: none">2. CLT 板拼接處的炭化率較大。建議研究成果界定拼接處的影響範圍。3. 後續 CLT 板的驗證方法，有關試體的製做，建議有接合部，亦即要含接合工法。4. 研究成果有關修正規則的提案。建議以最常見板片構造方式與接合方式為典型案例提出。
----	--

「前瞻建築防火避難及結構防火科技研發整合應用計畫(二)
協同研究計畫」

第 2 案「直交集成板(CLT)構造防火設計之研究」

第三次專家座談會議紀錄

專家學者	專家意見
<p>孫立言 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 9.3 增訂內容前提適用條件不夠明確，尾數/總厚度/內層厚/強弱軸順序.....。 2. 廠商資料可運用，但不宜揭示在規範中，宜納入研究案之章節。 3. 表 9-3-2 將數據的材種刪除，4(日本扁柏)、5(歐、雲杉)另寫(不限日本扁柏、歐洲雲杉)。 4. 火害後殘餘強度評估方法需不需要進規範中? 5. 直交集成版 CNS 16114.定義。
<p>雷明遠 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 產品驗證建議可分為兩階段，一方面購材等項符合相關 CNS 品質標準，另一方面建議須經建築主管機關認可(事先須先經認可防火試驗測試過)。 2. 建議增列 CLT 板的拼接板(Spline)，螺栓的規定。
<p>黃昭勳 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因集成元在弱軸方向的 EI 值假設為 0，當炭化深度超過某一層時，CLT EI 值將出現階梯(跳躍)式變化，建議可補充一張示意圖(例如殘餘 I 值比例與炭化深度關係圖)。 2. EI 值與構材之撓曲變形成反比屬於「勁度」，構材之實際撓曲強度應與斷面模數 $S=I/C$ 成正比，且由 S 最小者控制建議加以區別。
<p>楊正裕 委員</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請問修訂相關法規是否在本研究完成後即刻推動，亦或是在後續研究完備再進行。 2. 未來法規呈現方式是否以正面表列方式規定符合之產品規格，希望能明確相關規格細節。 3. 是否排除美國或歐洲以公式推估炭化深度之可能。

林法勤 委員	<ol style="list-style-type: none">1. 可考慮材料的發熱性質試驗2. 試驗材料樣本有限，未來納入規範應詳述適用條件範圍。3. 跑一下「炭化深度等值線圖」。看一下結果。
莊英吉 委員	<ol style="list-style-type: none">1. 理論與實驗之撓曲變形，建議請加 $L^2/400d=D$ 之限制值。2. 建議定義板材厚度許可差，參考 CNS 16114。

直交集成板(CLT)構造防火設計之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：王榮進、蔡孟廷、楊德新、雷明遠、李其忠、
詹家旺、趙偉成、汪姮慈

出版年月：109年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-5450-30-4（平裝）