

*國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所副教授

**財團法人台灣營建研究院副研究員

***國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所碩士生

第一章 緒 論

1-1 研究動機與目的

自十九世紀後半葉迄今，由於產業革命引起社會結構及經濟結構之變化，文明國家人口急遽膨脹，且人口又大都往都市集中，大都會區因而迅速發展，使得建築物朝向緊密而「高」立的趨勢發展。而此種傾向無止境地隨年逐增，當然隨著時代進步台灣地區亦不例外，在這種高密度的都市叢林裡，建築物火災案件頻傳，每每造成嚴重的人員傷亡及財物損失，帶給社會與個人極為慘重的損失，火災對建築物而言，無疑是發生頻率最高、損失最嚴重的外加災害。

在建築物規模較小或防火區劃無法阻止火災蔓延時，將形成單體建築物的全面性燃燒炎上，此時建築防火上之對策，若從加害防止的概念出發，乃是希望發生火災之建築物不要繼續擴大延燒至鄰棟建築物，引起鄰棟建築物發生火災。而若兼顧加害防止的概念，則同時亦要求建築物本身應具備防止鄰棟建築物發生火災時，不受波及之防火能力。我國目前的建築物大多為防火構造或防火建築物，如鋼筋混凝土造、鋼骨鋼筋混凝土造、耐火鋼骨造等，不會發生如木造建築般的「炎上」現象，所以建築物外牆開口大小與鄰棟之間隔距離成了火災擴大延燒與否最重要之支配因素。

由於國內之建築生態多為高密度集中形態，且多數的防火巷被違規佔用、加上不當廣告招牌，火災時將增加鄰棟延燒機會。另台灣地區位於地震帶，地震時將引起都市多發性建築單體火災，此時

若消防能力亦因地震受到損失，更是徒增火災延燒之危險，進而使建築單體火災發展至集團火災而形成所謂的「都市大火」。為防止此等大火災的危害，有必要對造成防火建築物鄰棟延燒之外牆開口與間距關係予以明確化。

本研究之目的，即希望透過蒐集國內外有關建築物延燒相關資料、經由實體模型試驗探討經外牆開口之建築物間延燒火災行為、以建立防止建築物擴大延燒有關法規研修（訂）基礎數據資料。

1-2 研究範圍

本研究針對建築物外牆開口與鄰棟間隔大小，在火災時建築物間延燒之影響進行探討，而主要研究範圍包括下列四個部份：

- 一、蒐集整理國內外之相關資料。
- 二、以學理及模型實驗分析，瞭解火災特性。
- 三、推導建築物延燒之開口大小與間隔距離之關係。
- 四、分析實驗結果與學理推導，擬定防止建築物延燒之對策，以為修法之參考。

1-3 研究方法與步驟

本研究方法依圖 1-1 之流程所示步驟進行。

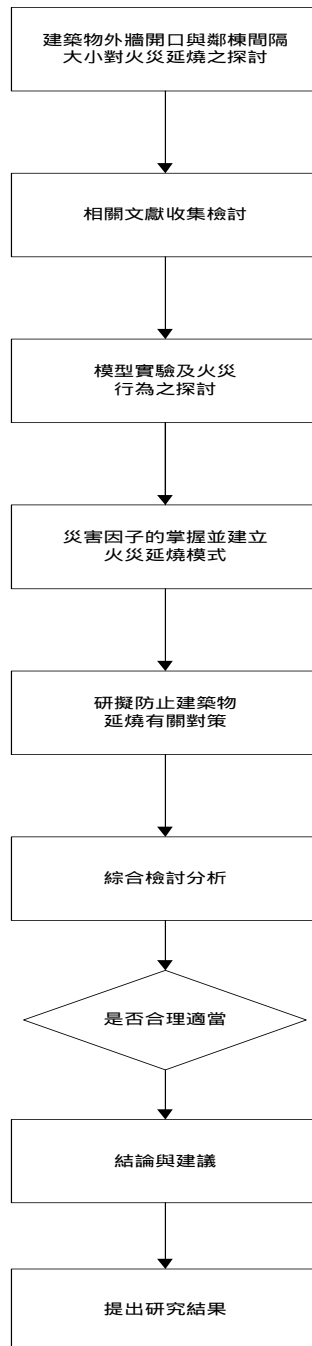


圖 1-1 研究計劃流程圖

第二章 延燒火災行為探討

一旦防火構造或防火建築物居室發生火災，火災於成長期無法有效抑制，而進入火災之最盛期「全面燃燒」時（如圖 2-1 所示），此時室內溫度可高達 800 ~ 1200 【1,2,3,4】，而若建築物之燃燒速度未受到限制，即室內之可燃物量足夠且空氣供應充足時，其熱分解所產生之可燃性氣體並非全部都在室內反應燃燒，而是有一部份未反應之可燃性氣體向開口部外噴出，在外部燃燒發熱並形成火焰【5】，對開口外部之左右上下及前面各方造成延燒之影響。

而一般木造建築物發生燃燒時，除了防火構造或防火建築物居室火災之影響外，由於木造建築物之外牆、屋頂、門、窗等為可燃性材料，其燃燒形態是整棟全面燃燒炎上【6】，燃燒區域面積較防火者為大，所帶來的火災破壞力相對較危險，且在風勢的助長下，更有可能因而發生飛火現象。

2-1 棟間延燒類型

防火建築物、防火構造物或木造建築物間之延燒，一般而言，不外乎飛火、接焰與輻射熱等三種原因，而接焰與輻射熱二者常是相互作用，同時發展進行的，尤其是近距離之延燒，火焰接觸造成之加熱與輻射熱，幾乎是同時作用的；距離稍大者，則是輻射熱先行加熱，木質材料等可燃性材料之溫度升高到一定點之後，一旦火焰前端接觸時，瞬間即行引火；若距離更遠者，則受輻射加熱或未受輻射加熱之木質材料，皆可能接觸飛散之火星而引發火災，若木質材料等可燃性材料承受大量之輻射熱時，亦可能無焰著火而造成自然起焰【7】。

2-1-1 飛火

一般木造建築物發生燃燒，且在風勢較強勁情況時，下風火星會隨著風或熱氣流向天空飛舞著，一旦掉落在附近一帶之建築物上，便有可能引起飛火火災，因而可能造成延燒擴大或形成都市大火。此種飛火乃火粉附著於木質材料等可燃性材料之各種媒介物上所引起的（如表 2-1 所示），以下對飛火之特性詳加以介紹。

（一）飛火之發生

飛火之發生，除了風速外，並視火場燃燒火勢之強弱而定。普通防火構造物或防火建築物之燃燒，未必會發生飛火現象，但大型木造建築物劇烈燃燒時，飛火發生之可能性，必然大增。一般而言，火勢到達相當程度之焚燒狀態時，即有發生飛火之危險性。至於飛火之發生率與風速之關係，亦成正比，自風速 5m/sec 開始，風速愈大，火場之燃燒愈猛烈，其發生之必然性也愈大（如圖 2-2 所示）【8】。

1976 年日本酒田發生都市大火（如圖 2-3 所示），火災初期延燒至鄰接之大沼百貨公司，由於此大樓火災發生了多數的飛火而成為都市延燒的媒介【9】。

（二）飛火之距離

飛火與風之關係及其到底可以到達多遠之距離，對於此一問題，歷年來有兩種看法【10】。其一風速愈大，飛火距離愈近。其二為風速愈大，飛火距離愈遠。而依據失島安雄氏之調查，發現風速愈大，飛火距離亦愈增加，但風速若超過 16m/sec 以上時，距離反而會減少。故當風速在 16m/sec 以下者，風速與飛火距離成正比，而風速超過 16m/sec 以上時，則成反比。問題是火災現場風速並非一直保持一定，當風速減弱時，飛火即有可能飛往較遠處。若從消防及防火研究之立場來看，則以第二種說法比較穩當。

在都市大火的例子中，日本富山縣火災（1944 年）在平均風速 13m/sec 以下時，曾寫下 2750m 的最大飛火距離，由此可見飛火之

涵蓋範圍是非常寬廣的。當然飛火到達的距離除風速外，也會因上升氣流的傾斜角及星火的性質、粒徑而異（如圖 2-4 所示）【8】。

（三）飛火星之類別

依日本學者龜井幸次郎之研究【11】，飛火星之種類約有下列數種：

- 一、火花及粉狀火星
- 二、棒狀火星
- 三、葉狀火星
- 四、板狀火星
- 五、加熱之鐵皮
- 六、塊狀火星
- 七、其他著火物

2-1-2 接焰

「接焰」之意為燃燒建築物之火焰接觸到鄰棟建築物，因而產生鄰棟間之延燒。無論木造建築物間或防火建築物間之接焰延燒原因，不外乎建築間之防火間隔過窄，或是建築物本身之燃燒狀態過於劇烈而引起的。

木造建築物一旦側壁上端或屋頂燒透，燃燒狀態即達火災最盛期，此時屋頂、牆壁、柱子及樑等會因此傾斜、燒落或倒塌，處處燃燒的掉落物或燃燒建築物本身，隨時可能會與鄰棟建築物之可燃部分發生接焰燃燒，另即使無燃燒物掉落，木造建築物之火勢燃燒炎上及在強風的助長下，也有可能形成傾焰流與鄰棟建築物可燃部分發生接焰現象。故木造建築物之接焰延燒支配因子為，建築物內之可燃物及建築物本身（外牆及屋頂）。

防火建築物或防火構造物居室燃燒時，其發生接焰的途徑對防火造者雙方而言，儘只有外牆開口部一途而已，其外牆開口部噴出

之火焰距離高低遠近，大致受限於火災室內之可燃物量多寡、可燃物擺設位置、及外牆開口部大小等支配因素【12】。

2-1-3 輻射熱

小規模之建築物火災，其延燒之主因為接焰，而大火災時之延燒主因為輻射熱。木造建築物、外壁防火的木造建築物或防火造建築物等燃燒時產生輻射熱之方式過程不同，當達到火災最盛期，木造建築物燃燒炎上，此時之加害輻射熱為最大值，加害輻射源之考量為（一壁面面積 + 一方屋頂面噴出之火焰面積），如圖 2-5 所示。外壁防火的木造建築物，當其達到火災最盛期時，其加害輻射源之考量為（一壁面開口部總面積 + 一方屋頂面噴出之火焰面積 + 一壁面之弱輻射熱面積），如圖 2-6 所示。防火造建築物之最大加害輻射源考量為（一壁面開口部總面積 + 一壁面外牆開口部噴出之火焰面積），如圖 2-7 所示【8】。

當木造或防火造等建築物延燒的區域愈廣時，則會形成街廓火災，此種大火災時，金字塔形的火焰四處林立，產生之加害輻射熱非常大。假使火災持續時間愈長，對面向區域之受害輻射熱量愈大，進而導致更遠距離的輻射熱延燒。

此種類型延燒與否之判定，在於相向之可燃建築物受熱是否超過造成起火燃燒的容許輻射受熱量，在防火造建築物與木造建築物而言稍有不同。防火造者，若外壁之受熱程度達到 260 或輻射熱達到 $1.0\text{w}/\text{cm}^2$ 以上時，不見得會產生危險，但外壁與內壁木材等可燃材料接觸點之溫度，達到上述之量時，即有起火燃燒之可能；而一般木造者、外壁或開口部為木質材料等可燃材料時，則表面溫度達到 260 或輻射熱達到 $1.0\text{w}/\text{cm}^2$ 以上時，即有延燒之危險【7,41】。

2-2 影響棟間延燒之相關法令

2-2-1 國內

(一) 外牆開口限制【13,14,15】

建築物外牆開設門窗、開口、廢氣排出口或陽台，依左列規定：

- 一、門窗之開啟均不得妨礙公共交通。
- 二、緊接鄰地之外牆不得向鄰地方向開設門窗、開口及設置陽台，但外牆或陽台外緣距離境界線之水平距離達 1 公尺以上時，或以不能透視之固定玻璃磚砌築者不在此限。
- 三、同一基地內各棟建築物間或一棟建築物內相對部份之牆開設門窗、開口或陽台，其相對的水平淨距離應在 2 公尺以上；儘一面開設者，其水平淨距離應在 1 公尺以上。但以不能透視之固定玻璃磚砌築者，不在此限。
- 四、向鄰地或鄰幢建築物，或同一幢建築物內之相對部份，裝設廢氣排出口，其距離境界線或相對之水平淨距離應在 2 公尺以上。

(二) 防火間隔【13,14,15】

一、防火構造建築物之防火間隔：

防火構造建築物，除基地二面以上臨接寬度 4 公尺以上之道路或臨接深度 4 公尺以上永久性空地者外，依下列規定：

1. 建築物應自基地後側面之境界線退縮淨寬 1.5 公尺以上之空地為防火間隔。防火間隔並應配合依本編第九十條規定留設出入口及通路。
2. 市地重劃地區，應由直轄市、縣（市）政府規定整體性防火間隔，其淨寬應在 3 公尺以上，並應接通道路。
3. 同一基地內有二幢以上建築物，每幢建築物之背面或側面適用第二款規定。

二、非防火構造建築物之防火間隔：

非防火構造建築物，除臨接建築線部份外，建築物應自基地各側境界線（後側及兩側）退縮淨寬 2.5 公尺以上之空地為防火間隔。

三、防火間隔特別規定：

防火間隔之淨寬度，直轄市、縣（市）政府認為有必要者，得視實際情形，報經中央主管建築機關核可加寬並公告之。

（三）建築技術規則相關規定【16】

現行建築技術規則，有關防止擴大延燒至鄰棟建築物方面之規定極為不完備，僅僅規定屋頂為不燃材料所建造（規則 64）、防火建築物之外牆為防火牆（規則 1-28，77）及規定防火區內高度在 3 公尺以上或屋頂上之廣告牌（塔）、裝飾物（塔），其主要部份應使用不燃材料。至於其他構造是否需要具備防止鄰棟延燒之防火性能，並無具體之規定（防火門窗）。

2-2-2 國外

- 一、關於側壁之高度，我國建築法規中絲毫未曾提及，但日本建築法規上規定至少需有 90 cm 以上之高度。
- 二、依日本建築基準法，該國規定屋頂必需採用不燃材料所建造，耐火建築物之外牆為防火牆，開口部必需設置防火門窗，該國構造建築物凡是距離境界線或同一基地內與他棟建築物間中心線在一樓部份 3 公尺、兩樓以上部份 5 公尺所涵蓋之範圍內有建築物部份即應採取防火構造性能之外牆，開口部份應設防火門窗【16,17,18】。

2-3 台灣地區可能產生之棟間延燒類型

一般建築物棟間之延燒類型，不外乎飛火、接焰及輻射熱等三種，然而台灣地區除在光復初期，有為數不少的違章木造建築物外，隨著都市發展，更新建築材料，近年來台灣地區建築物之結構形態，已經逐漸轉變為耐火建築物情況下，飛火是較不可能在台灣地區發

生的，若有延燒之虞應屬接焰情形與輻射形態。

以下就台灣地區之接焰與輻射熱對鄰棟延燒之可能性與否加以分析：

(一) 接焰

防火構造或防火建築物居室燃燒，其發生接焰的途徑只有外牆開口部一途，以下就外牆開口部大小、噴出火焰行為與鄰棟間隔之關係作一檢討。

根據圖 2-8 得知【19】，防火建築物或防火構造物居室燃燒時，由外牆開口部噴出火焰之軌跡在開口部形狀為正方形時，噴出火焰之外緣離開口部最遠，發生接焰之可能性最大，而此條件下噴出之火焰和建築物外牆開口部之橫向距離比最大約為 0.8，其火焰可能高度軌跡與開口部高度比約為 3.5。

即假設有一開口部大小為 2m×2m 時，噴出火焰高度（從 1/2 窗戶高度）此時若為 7m，其橫向火焰距離不超過 1.6m。如果以計算的方法，使用 Yokoi、Jansson-Onnermark、與 Thomas-Law【20】之計算方法，採取最保守的 Thomas-Law 方式，得知在開口部為 2m×2m 時，火焰高度 6m 還不到。

即使以 Law 在自然換氣情況下計算，其橫向距離也是不到 1.8m，故以國內建築法規來論，規定 1m 距離內兩棟建築物間不准開窗，1m~2m 之距離只准單側（單棟）開窗，2m 以上距離才准兩側（兩棟）開窗之情形看來，接焰情形的延燒在台灣地區是較不可能會發生的。

(二) 輻射熱

台灣地區位於太平洋地震帶上【21,22】，地震頻率自然相當頻繁，且隨著民眾用火形態的改變，瓦斯、電氣產品、汽油等易燃物品到處充斥，一旦發生大型地震時，極可能會產生同時多發性建築物居室火災【23】。這些獨立的居室火災燃燒，其外牆開口部及噴

出火焰之加害輻射熱，會連合成為一大面積的加害輻射熱源，有可能造成獨立居室輻射熱原本不會延燒到的地方發生燃燒，尤其在台灣地區，建築生態為高密度集中形態狀況，且多數防火巷被違規佔用，是更加有可能由單體火災演變成為都市大火的。

2-4 輻射延燒機制

2-4-1 輻射傳熱原理

火災時火焰所呈之顏色，主要係浮游於火焰之火粉以及碳素微粒子放射之結果，而火焰所產生之輻射熱，亦是由於這些物質熱放射之結果。輻射熱即是指自一有限溫度之物質放射出能量的熱傳過程，它本身具有電磁波的特性，所以它的熱量傳遞不須經過界質的。依據近代物理或物理學，一個理想的放射物體俗稱黑體(Blackbody)輻射放射能，可以由史帝芬-波茲曼定律(Stefan-Boltzman Law)來表示【24,25,26】：

$$q'' = \sigma \times T_s^4$$

q'' ：表示黑體之放射能量 (W/cm²)

σ ：史帝芬-波茲曼常數 (=5.67×10⁻¹²W/cm²k⁴)

T_s ：物體之絕對溫度 (K)

然而，大部分的物體並非是理想的放射物體，在此種情形下：

$$q'' = \epsilon \times \sigma \times T_s^4$$

ϵ ：為物體表面材質的輻射性質，稱之為放射率【27,28】。

由以上式子可以得知，絕對溫度的四次方和輻射熱間成比例關係。

2-4-2 輻射放熱面積分析

此所謂的輻射放熱面積，是指防火建築物開口部及噴出火焰面積所構成的區域，而開口部尺寸為已知條件可以掌握，故開口部噴

出之火焰是為探討的對象。

影響噴出火焰之因子如下【5,29,30】：

- 一、火災室之型態（區劃之形狀、尺寸）
- 二、開口部之形狀、尺寸
- 三、區劃周壁之熱性質
- 四、室內可燃物之種類、量、配置形態
- 五、風速及風向

以下將噴出火焰之面積分成寬度、高度及形狀三部份進行討論。

（一）噴出火焰之寬度

（1）Margaret Law

根據 Law 之研究中指出【31】，在自然換氣（Natural draft）及強制換氣（Forced draft）情況下，如圖 2-9 所示，其噴出火焰之寬度不盡相同，以下對其說明之。

一、自然換氣（Natural draft）

在此種通風狀況下，火焰之寬度幾乎等於開口部之寬度，開口部之尺寸為 $w < 0.8h$ 且上方有牆壁或開口部上方無牆壁時，噴出火焰之水平向軌跡最易受風力之左右，但其火焰和牆壁間之角度最多不會超過 45° ；一般建築物之燃燒為此種形式。

二、強制換氣（Forced draft）

強制換氣之情況下，火焰寬度之變化與火焰尾端距開口部之遠近成線性關係，火焰離開口部越遠之寬度越大，其火焰軌跡如圖 2-9 所示。此種燃燒形式在一般的住宅是較不會發生的，但為了保守起見，參考此種情形。

噴出火焰最大寬度為 W_z (ft)

$$W_z = W + 0.4x,$$

$$x = 0.077x(u^2/h)^{0.22}x(z+h)$$

$$u = 180\text{ft/min}$$

(2) 建設省建築研究所【32】

根據日本建設省建築研究所之研究指出，當火災荷重在 5kg/m^2 以下時，噴出火焰之寬度會呈 15° 左右之擺幅（如圖 2-10 所示）。而此種情形是較不可能發生的，因為根據調查統計，一般醫院及旅社之火災荷重約為 15kg/m^2 ，學校及共同住宅約為 25kg/m^2 ，辦公室及店舖約為 40kg/m^2 【33】。

(二) 噴出火焰之高度

火焰高度受燃燒速率控制，而燃燒速率又受室內火災荷重支配與開口因子 ($A \times h^{0.5}$) 控制，如圖 2-11 所示【20】，可由 Yokoi、Jansson-Onnermark、與 Thomas-Law 之研究中找出其關係。

(1) Yokoi

A =開口面積(m^2)

H =開口高度 (m)

熱分解速度之上限：

$$V_{\max} = 6 \times A \times H^{1/2} \quad (A \times H^{1/2} < 3.5) \text{ (kg/min)}$$

$$V_{\max} = 15 + 1.7 \times A \times H^{1/2} \quad (A \times H^{1/2} \geq 3.5) \text{ (kg/min)}$$

熱分解速度之下限：

$$V_{\min} = 6 + 1.2 \times A \times H^{1/2} \quad \text{(kg/min)}$$

線熱源之假定：

$$Q = (V_{\max} - V_{\min}) \times H / A / 2 \times 315 \quad \text{(kw/m)}$$

噴出火焰高：

$$Z = 0.026 \times Q^{3/2} - H / 2 \quad \text{(m)}$$

(2) Jansson-Onnermark

$$Z = \alpha \times (\Delta R) / (A \times H^{1/2})$$

$$R = 6 \times A \times H^{1/2}$$

$$R_1 = C_1 \times A g + C_2 \times A \times H^{1/2}$$

ΔR : $R - R_1$ (如圖 2-12 所示)

Z：火焰高度 (m)

α ：實驗係數，0.7

R：燃燒速度 (kg/min)

R_1 ：閃燃時之燃燒速度 (kg/min)

C_1 ：與室內裝修材料有關，一般混凝土為 0.27，輕質混凝土為 0.18，一般計算取 0.25。

A_g ：樓地板面積 (m^2)

C_2 ：1.25；試驗係數

(3) Thomas-Law

$$Z+H=18.6 \times (R/W)^{2/3}$$

$$R=5.5 \times A \times H^{1/2}$$

Z：火焰高度 (m)

H：開口部高度 (m)

R：燃燒速度 (kg/sec)

W：開口部寬度 (m)

比較各種不同的火焰高度計算法之差異，假設條件一樣，樓板面積為 $15m^2$ ，房間內之表面為混凝土 ($C_1=0.27$)， C_2 為 1.25，開口高為 $H=1.3m$ ，寬度為 0.65m、1.5m、3.0m，所以 $AH^{1/2}$ 為 $1.2 m^{5/2}$ 、 $2.2 m^{5/2}$ 、 $4.5 m^{5/2}$ ；結果發現各種算法之噴出火焰高度 (z) 差異很大，其中以 Thomas-Law 之算法之值最大 (如表 2-2 所示)。

(三) 噴出火焰之形狀

火焰形狀可謂千變萬化，其焰形受很多條件影響，諸如風、火災荷重等，但大至上焰形還是有其一定的軌跡可尋，根據 Law 之研究中指出火焰形狀為類似蓮花狀 (如圖 2-13 所示)，而從實際拍攝到的照片中可以觀察到，火焰之形狀也有些許類似蓮花狀 (如圖 2-14,2-15 所示)，兩者都屬於火焰尾端較小而源頭較寬之形狀。

2-4-3 輻射放熱與火焰溫度關係

可燃物如獲得充分之氧氣供應，且氣體與空氣混合而完全燃燒時，其火焰之溫度依據計算應可以達到 2000 以上之高溫，惟呈現此溫度之氣體濃度範圍甚小，故在空氣中可得之最高溫度大約為 1200 1300 ，而實際上一般的火災室達到全盛期時，其火災室之平均溫度又較低，只能將溫度維持在 800 1200 左右【34】。

根據 Yokoi、Segil、Thomas、Butcher-Pamell (如圖 2-16 所示) 之研究及建設省建築研究所之熱映像圖得知 (如圖 2-17 所示) 【35】，開口噴出火焰之溫度之量測平均約在 500 600 之間【36】，在熱映像圖中 (如圖 2-18 所示) 【44】，從側面可清楚看出其火焰溫度之分布，最低溫度約為 26 ，最高溫度約在 430 左右。Jansson-Onnermark 之研究中並指出，開口部上緣之下方 10 cm 處之溫度最高約為 850 (如圖 2-19 所示)。

依據上述種種之值及熱映像圖，火焰在開口部範圍近距離內之溫度應與火災室之溫度相差無幾，至於在開口部以上之火焰溫度應如圖 2-18 所示之溫度分布情況；以此為理論基礎，依造 Law 對火焰溫度之推估公式 (1)，最低溫度取 430 ，最高溫取為 850 ，得出噴出火焰面之平均溫度約在 705 左右。

$$T_z^4 = (T_0^4 + T_x^4) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$T_z^4 = ((850 + 270)^4 + (430 + 270)^4) / 2$$

$$T_z = 705 + 270$$

T_z ：平均溫度 (絕對溫度)

T_0 ：最低溫度 (絕對溫度)

T_x ：最高溫度 (絕對溫度)

本研究採取上述之值，將 705 作為輻射熱計算之條件，應是合理且保守的，以下以各種方式計算輻射熱：

(1) 史帝芬-波茲曼定律

$$q'' = \epsilon \times T_s^4$$

將各已知條件帶入，火焰之 ε 取最大為 1.0， σ 為 $5.67 \times 10^{-12} \text{W/cm}^2 \text{k}^4$ ， T_s 為 $(705+273)$ 。

$$\begin{aligned} q'' &= 1.0 \times 5.67 \times 10^{-12} \times (705+273)^4 \\ &= 5.19 \text{W/cm}^2 \end{aligned}$$

(2) Butcher-Pamell

從其研究中得到溫度在 1100 時，其輻射熱為 16.8W/cm^2 ，由史帝芬-波茲曼定律可以得知，絕對溫度的四次方和輻射熱間成比例關係，故可以求出在 705 時之輻射熱。

$$\begin{aligned} 16.8 : (1100+273)^4 &= q'' : (705+273)^4 \\ q'' &= 4.34 \text{W/cm}^2 \end{aligned}$$

由以上以推估結果得知，輻射熱在溫度為 705 時之最大值約為 5.19W/cm^2 ，另外根據 Oleszkiewicz 近距離所量測之平均值約為 5W/cm^2 左右（如圖 2-20 所示）【37】；如此看來理論與實際兩者之間的值頗能吻合，但有其他學者如 Yokoi，對木造建築物輻射熱之假設卻為 10W/cm^2 【38】，兩者間之值差異相當大，故應該以試驗找出最適當之值以為理論推估。

2-4-4 輻射受（傳）熱與距離之關係

輻射熱係與火焰面之大小，時間之長短而產生距離之差異，火焰面積愈大，火災時間愈長，輻射熱到達之距離愈遠，最遠更可到達 100m 以上。

根據橫田金一郎對新舊木材之研究【39】，新材較舊材難以燃燒，須連續 8 分鐘提供以 $7000 \text{kcal/m}^2 \text{h}$ 之輻射熱量才能使新材著火，舊材需要 $4000 \text{kcal/m}^2 \text{h}$ 。本研究以 $8547 \text{kcal/m}^2 \text{h}$ (1W/cm^2) 作為瞬間能使木質材料等可燃物著火之輻射強度，並配合前面的輻射源熱量可能之值約為 5W/cm^2 ，與估算的輻射源面積，以形態係數之值最大不得超過 0.2 之條件下，即可找出形態係數和距離間之幾何關係，

進以決定任一點所承受之輻射熱。

觀察公式 (2) 得知，距離和形態係數成反比，最大受熱點在輻射面積之中心線上，故可將公式 (2) 轉換成公式 (3)。

輻射源對任一距離之形態係數計算公式 (如圖 2-21 所示)：

$$F = \sum fi$$

$$fi = g(\Delta y + Di, \Delta z + Hi) - g(\Delta y + Di, \Delta z) - g(\Delta y, \Delta z + Hi) + g(\Delta y, \Delta z)$$

$$g(a, b) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{a}{\sqrt{c^2 + a^2}} \times \tan^{-1} \frac{b}{\sqrt{c^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{c^2 + b^2}} \times \tan^{-1} \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right]$$

$$c = \Delta x = x - x_0, \Delta y = y - y_0, \Delta z = z - z_0$$

(2)

公式 (3)，輻射源對任一距離之最大形態係數計算，如圖 2-22 所示【40,41,42】：

$$a = W/2$$

$$b = H/2$$

$$X = a/c$$

$$Y = b/c$$

$$F = 4.0 \times \frac{1}{2\pi} \left[\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \times \tan^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \times \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right]$$

(5)

F：形態係數 (無次元)

W：輻射源寬度 (m)

H：輻射源高度 (m)

X：受熱點至輻射源之距離 (m)

另外由 NFPA 之研究中 (如圖 2-23)【43】，也可得知開口率、開口部形狀比 (W/H, H/W) 以及和延燒危險度 (火載量) 成正比 (如表 2-3 所示)，且與鄰棟之間隔距離成正比，如公式 (4) 所示；NFPA

之研究儘針對個別獨立開口之延燒，鄰棟間相互之間隔配置問題討論，對有高度或整排之建築物較難以歸納出整體結果，故本研究之分析採用公式（2）。

$$d = F \times N + 5 \quad (4)$$

d：建築物間相互之間隔（ft）

F：W 或 H 之較小值（ft）

N：表 3-2 中之指標

W：火災室之內壁寬度

H：火災室之內壁高度

表 2-1 飛火形成木造建築物之著火部位與件數百分比

表 2-2 不同火焰高度計算法之結果

表 2-3 形狀比與開口率之指標 (N) 對照表

圖 2-1 火災成長溫度與時間關係示意圖

圖 2-2 飛火件數與風速的關係圖

圖 2-3 日本酒田大火之概況

圖 2-4 飛火星火粒徑等高線例

圖 2-5 木造建築物輻射源面積計算示意圖

圖 2-6 外壁防火的木造建築物輻射源面積計算示意圖

圖 2-7 防火造建築物輻射源面積計算示意圖

圖 2-8 開口形狀與噴出火焰軌跡之關係圖

圖 2-9 強制換氣與自然換氣下之噴出火焰軌跡圖----Law

圖 2-10 火焰軌跡圖----建設省

圖 2-11 燃燒速度、開口因子及火焰高度關係圖

圖 2-12 ΔR -- $AH^{1/2}$ 關係圖

圖 2-13 火焰形狀----Law

圖 2-14 火焰形狀----建設省實際照片

圖 2-15 火焰形狀----建設省實際照片

圖 2-16 噴出火焰溫度示意圖

圖 2-17 熱映像圖

圖 2-18 熱映像圖

圖 2-19 開口上方下緣 10 cm 處之溫度

圖 2-20 輻射熱及熱對流關係圖

圖 2-21 示意圖

圖 2-22 示意圖

圖 2-23 示意圖

第三章 實體模型火災模擬試驗

3-1 試驗的意義

由國外一些研究得知【28,37,38,44】，火災時外牆開口噴出火焰之輻射熱及火焰高度分析，方向大都是偏倚在分析單獨開口近距離範圍內之輻射熱，再者對火災室之火載量及外牆開口部之組合一直無明確的結論。

本試驗主要目的在於，以實體模型模擬居室火災行為，並配合以適當變化的火載量、開口部以及火災室，分析外牆開口所產生之輻射熱，進而就棟間間隔距離大小關係，探討延燒火災行為。

3-2 試驗計劃

本研究為求試驗結果能應用於實際狀況，特利用鋼筋混凝土構造之全尺寸兩層樓實體模型，模擬各用途防火建築物發生火災之情形，進行火災行為之探討。研究主要內容包含下列幾點：

- 一、探討相同火災荷重下，不同開口部條件射熱和距離之關係。
- 二、探討相同開口部條件下，不同火災荷重之輻射熱和距離之關係。
- 三、探討一層樓單獨燃燒與兩層樓一起燃燒間之火災行為關係。
- 四、分析各種開口部以及各種火災荷重組合之火焰行為。

3-3 試驗方法

本研究係探討各種開口條件和不同的火災荷重所產生之火焰行為，及輻射熱和距離之關係。

3-3-1 試驗變數之選定

試驗變數之考慮係採一般建築物開口部常見之尺寸規格，及最危險的開口形態，並對不同使用形態之建築物，如商店、醫院、辦公室、學校、一般住家等各種不同的火載量進行探討，以期研究結果能對建築物開口及安全間隔距離提供明確的建議。試驗變數內容分述如下，如表 3-1 所示：

(一) 開口部

本研究係探討開口部大小對鄰棟延燒之影響，故利用全尺寸實體模型來探討各種開口所產生之火焰行為，並分析其試驗結果，對開口大小之限制提供明確的建議。故開口條件之選擇，注重的是要符合國內大多數建築物的形態，及其引發之危險性較大者，開口變數之選擇如下：

- 一、1.70m (寬) × 1.70m (高)，離地板面 1670 cm；一般窗戶或開口一般約在 1.70m 左右，且由文獻中正方形的開口其噴出火焰的軌跡最遠，故此種形狀之開口在一定的面積下應是最危險的。另外將開口部設置於火災室之最上端，如此其噴出之火焰高度最高。
- 二、1.70m (高) × 3.40m (寬)，離地板面 1670 cm；此種開口形態也是較常見的，故在此探討全面開口之後果。另外將開口部設置於火災室之最上端，如此其噴出之火焰高度最高。

依實際觀察及本試驗是兩層樓實體模型，因此試驗變數在一樓和二樓都設為相同。

(二) 火載量

由於各類用途建築物內部之可燃物不盡相同，以前建築物之火災行為檢討，通常將實際火災室中之裝修材料、地板材料、床（床墊）、傢俱等固定之可燃物，與書籍畫冊、衣物等收納類移動性可燃物換算成同等發熱量之木材，並除以火災室之地板面積，視為火

載量，可以 kg/m^2 表示之。

由於世界各國大多以此作為火災時間長短或建築物因火災受熱產生影響的重要指標，且火載量著實影響火焰行為，因此為了模擬各類用途之建築物及配合實際應用，將火災荷重列為試驗變數，變數之選擇如下：

- 一、 $40\text{kg}/\text{m}^2$ ；事務所及店舖等之火災荷重經調查及統計分析平均為此量。
- 二、 $25\text{kg}/\text{m}^2$ ；學校及集合住宅等之火災荷重經調查及統計分析平均為此量。
- 三、 $15\text{kg}/\text{m}^2$ ；醫院及旅社等之火災荷重經調查及統計分析平均為此量。

3-3-2 試驗流程

本研究之兩層樓實體模型的工程浩大且建造工期很長，故首先在模型建造期間進行火載量材料、熱偶線、發電機及電腦儀器配備等準備，其次再進行最主要之實體模型火災模擬試驗。試驗之整體架構流程，如圖 3-1 所示。

3-3-3 火載量用木材

本研究係利用國內易取得、量足且重量均勻之黃柳安木角材，作為火載量。試驗中係利用烘乾過的黃柳安木，依火災室之地板面積（ $2.50\text{m}\times 3.28\text{m}$ ），將火災荷重換算成等值之木材重量，換算結果為火災荷重 $40\text{kg}/\text{m}^2$ 可以用 328kg 之木材替代、 $25\text{kg}/\text{m}^2$ 為 205kg 木材替代、 $15\text{kg}/\text{m}^2$ 為 123kg 木材替代。

雖然一般建築物內部傢俱、衣物、木材等可燃物之擺設差異很大，本研究以均等分布設定，將計算過的黃柳安木分層平均疊放在火災室中，並在各木條間隙以浸過酒精的 crib 當作引火源，如圖 3-2 所示。

3-3-4 實體模型火災試驗

本試驗使用三種不同的火載量以及二種開口變數互相搭配藉以比較各種影響因子。

(一) 第一階段

本階段試驗以 1.70m×3.40m 之開口條件，搭配 25 kg/m² 之火載量，進行一樓居室燃燒之實體模擬試驗，藉以探討此種單一開口及火載量組合之火災行為。

(二) 第一階段

本階段試驗使用 1.70m×3.40m 之開口條件，搭配 40 kg/m²、25 kg/m²、15 kg/m² 之火載量，進行一樓及二樓居室燃燒之實體模擬試驗，藉以探討不同火載量在此種開口下之火災行為，並比較第一階段與本階段間之火災行為關係。

(三) 第三階段

本階段試驗使用 1.70m×1.70m 之開口條件，搭配 40 kg/m²、25 kg/m²、15 kg/m² 之火載量，進行一樓及二樓居室燃燒之實體模擬試驗，藉以探討不同火載量在此種開口下之火災行為，並比較第二階段與本階段間之火災行為關係。

3-4 試驗儀器與設備

3-4-1 全尺寸實體模型

(一) 全尺寸實體模型所在地

本研究之實體模型位於台北縣土城市國立台灣工業技術學院新校地內。實體模型位置如圖 3-3 所示。

(二) 全尺寸實體模型概要

本研究所使用之全尺寸實體模型，如圖 3-4 所示，其構想係參照 ASTM Standard Burn Room 及模型尺寸分析而來的。本試驗模型為兩

層樓鋼筋混凝土構造，鋼筋強度為 4200 kg/cm^2 ，混凝土強度為 2500 lb/in^2 ，牆壁及地板厚度為 12 cm ，地板、天花板、鐵門及各壁面覆以 12 mm 之矽酸鈣板，一樓之火災室容積為 3.28 m (長) \times 2.50 m (寬) \times 3.28 m (高)，二樓之火災室容積為 3.28 m (長) \times 2.50 m (寬) \times 2.88 m (高)，一樓及二樓之開口變化係利用耐火磚堆砌，如圖 3-5 所示。

3-4-2 輻射熱量計及冷卻水循環裝置

此儀器之功用為量測經由開口所產生之環境輻射熱，輻射熱量計依接收面可分為半開放式及全開放式兩種，半開放式的接收角度為 90° ，全開放式的角度較大為 180° ，本式驗將角度較小的輻射熱量計置放於後，角度較大的輻射熱量計置放於前。

輻射熱量計之使用還需要藉由冷卻水循環裝置才能產生效果，本裝置搭配 0.5 馬力、 0.37 kw 的抽水馬達、及壓縮機，以利水能及時將熱量帶離，求得最新的輻射熱量值，如圖 3-6 所示。

3-4-3 K-Type 熱電偶線 (Thermocouple)

此熱電偶線之功用為量測火災室、開口部四周圍之溫度，本研究採用之熱電偶線為 0.75 級 K-Type (CA)，它是由鎳鉻及鎳鋁兩根合金金屬導線組合而成的，其原理為利用前端焊接形成一迴路，利用兩金屬材料在不同溫度下有不同電位差原理計算其端接點溫度，使用時將線端放置於所要量測之點上，如圖 3-7 所示。

3-4-4 補償導線 (Thermocouple Extension Wires)

理論上，在試驗時熱電偶線直接與記錄儀器連接最為理想；然而實際上，常因距離太長耗費甚鉅，以及迴路上誘導因素，所引起的誤差致使測溫準確度降低。為了解決這些問題。宜使用與熱電偶線相同材質或其電動勢特性極近似之成對金屬導線，加以絕緣處理、包覆處理後，銜接熱電偶線與記錄器，並補償熱電偶線因冷接

端子造成之誤差，如圖 3-8 所示。

3-4-5 數據記錄器及電腦

前面所述之輻射熱量計及熱偶線，其尾端都須配合 YOKOGAWA HR-2500 型之溫度資料搜集器，及電腦的記錄，如圖 3-9 所示。

3-4-6 攝影機及照相機

利用攝影機及照相機記錄火焰形狀，如圖 3-10 所示。

3-4-7 發電機及穩壓器

由於試驗場地無電源供應設備，特準備一台 2500W 之汽油發電機，另為使電腦及精密儀器穩定，配置一台 2500W 的穩壓器，如圖 3-11 所示。

3-5 試驗步驟

3-5-1 儀器檢查

本試驗由於是利用全尺寸實體模型模擬實際火災行為，故每次之成本花費不少，且事前儀器架設、配線、燃料準備等工事繁瑣，加上場地不便，因此在希望節省時間以及經濟考量之情況下，進行試驗時須確保各偵測儀器設備正常，確定所得結果正確。以下將一些須特別注意的重點列出：

- 一、檢查記錄器與電腦儀器及各測定點所接收之數據是否正常。
- 二、檢查發電機之汽油量及其運作情形是否正常。
- 三、檢查冷卻水循環裝置是否正常。
- 四、檢查各偵測器、攝影機之運作情形及位置是否可以。
- 五、檢查各偵測器之架設是否牢固。

3-5-2 實體模型試驗

實體模型試驗之試驗步驟如下：

- 一、首先將 12 mm 之矽酸鈣板覆於火災室之地板、天花板及各壁面上（一樓及二樓）。
- 二、用耐火磚將開口部堆砌出欲試驗之開口條件。
- 三、將所需之木材（火載量）依序放入固定位置。
- 四、架設輻射熱量計、熱電偶線及攝影機就定位。
- 五、依前小節依序再檢查一次是否正常。
- 六、將浸過酒精之 crib 置入燃料之間隙中。
- 七、開始啟動記錄儀器、錄影、照相並記錄觀察整個試驗過程。
- 八、一樓及二樓同時引燃火源。
- 九、試驗開始。

3-6 測定項目與測定方法

3-6-1 氣象

（一） 氣溫與濕度

在試驗未開始前以溫度計及乾濕計測量當時之狀況；溫度計與乾濕計置於太陽光可直接照射到之位置，如圖 3-12 所示。

（二） 風向與風速

由於本模型場所位於室外，風的因素必定會影響火焰行為，但本試驗無配備風向計與風速計等儀器，故以無風或風較弱之狀態為試驗日。

3-6-2 火災室溫度

（一） 室內溫度

火災室正中央之天花板 10 cm 下緣，裝設一支熱電偶線，藉以量

測不同火載量及開口部條件下之火場溫度，併得與前人之研究比較；一樓及二樓相同，如圖 3-13 表示。

(二) 開口部溫度

開口部正中央下方 10 cm 處及正中央處，各裝設一支熱電偶線，藉以量測不同火載量及開口部條件下之開口部溫度，並得與前人之研究比較；一樓及二樓相同，如圖 3-14 表示。

3-6-3 噴出火焰溫度及輻射熱

以熱偶線及輻射計量測噴出火焰近距離之溫度及輻射熱，並測定離開口 1m、2m、3m、4m、5m、6m 外之輻射熱及溫度，輻射計及熱偶線之架設高度，以各開口部之中央的中心線為準，如圖 3-15 所示。

3-6-4 火焰形狀

在模型上方之鋼筋混凝土板及開口處之耐火磚上，每 50 cm 距離塗上油漆記號一道，如圖 3-16 所示，以為火焰高度之判斷，另外準備一塊劃有標記之板子置於旁，如圖 3-17 所示，作為火焰側方向之軌跡判斷，並以兩台攝影機置於模型之側向及正方拍攝火焰之高度、寬度及側方向之軌跡，如圖 3-18 所示。另外照相機隨時準備。

樓層	一樓
	二樓
開口尺寸	1.70m×3.40m
	1.70m×1.70m
火災荷重	40kg/m ²
	25kg/m ²
	15kg/m ²

表 3-1 試驗變數

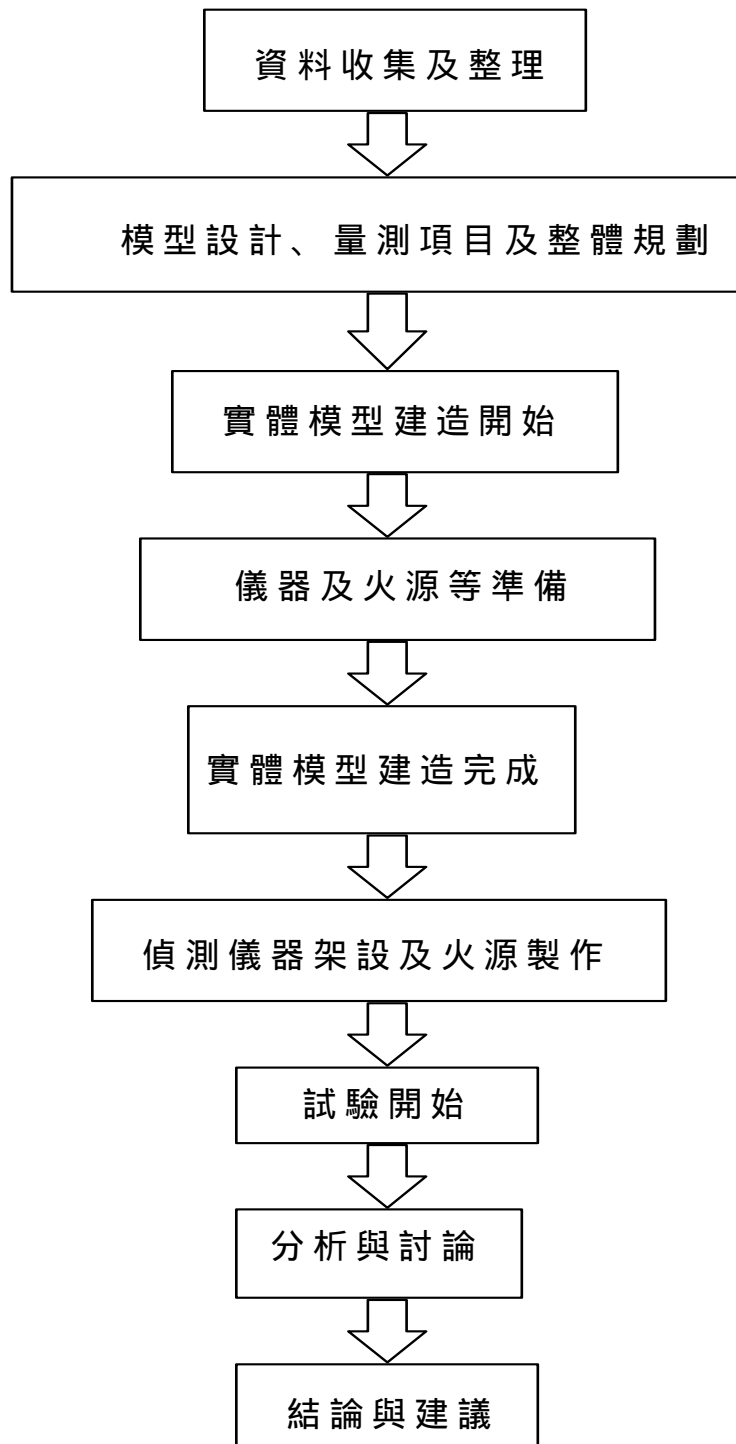


圖 3-1 試驗之整體架構流程圖

圖 3-2 (a) 40 kg/m² 之黃柳安木材堆置圖

圖 3-2 (b) 25 kg/m² 之黃柳安木材堆置圖

圖 3-2 (c) 15 kg/m² 之黃柳安木材堆置圖

圖 3-3 實體模型位置圖

圖 3-4 (a) 一樓平面圖

圖 3-4 (b) 二樓平面圖

圖 3-4 (c) 頂樓平面圖

圖 3-4 (d) 右側向立面圖

圖 3-4 (e) 正向立面圖

圖 3-4 (f) 背向立面圖

圖 3-4 (g) A—A 剖面圖

圖 3-5 (a) 1.70m×3.40m 之開口

圖 3-5 (b) 1.70m×1.70m 之開口

圖 3-6 (a) 輻射熱量計

圖 3-6 (b) 冷卻水循環裝置

圖 3-7 K-Type 熱電偶線

圖 3-8 補償導線

圖 3-9 (a) 數據記錄器

圖 3-9 (b) 電腦設備

圖 3-10 (a) 攝影機

圖 3-10 (b) 照相機

圖 3-11 (a) 發電機

圖 3-11 (b) 整流器

圖 3-12 溫度計及乾溼計

圖 3-13 量測室內溫度之熱偶線配置圖

圖 3-14 量測開口上方下緣 10 cm 溫度之熱偶線配置圖

圖 3-15 輻射計及熱偶線之配置圖

圖 3-16 火焰形狀正面觀測之刻劃線

圖 3-17 火焰形狀側面觀測之刻劃線

圖 3-18 攝影機之配置圖

參考文獻

- 1.仲谷一郎，「閉圍空間內之火災舉動關係研究」，昭和 58 年。
- 2.王信富，「全尺寸房間試驗」，碩士論文，交通大學，1996 年 6 月。
- 3.關根 孝，「混凝土造建物之室內火災溫度之推定」，日本建築學會論文報告集，第 85 號，昭和 38 年 5 月。
- 4.關根 孝，「混凝土造建物之室內火災溫度之推定」，日本建築學會論文報告集，第 86 號，昭和 38 年 6 月。
- 5.成瀨友宏，「閉圍空間火災性狀關係之研究」，博士論文，日本東京大學，1990。
- 6.木造住宅在來工法合理化促進事業，不燃化委員會報告書。
- 7.陳弘毅，「火災學」，鼎茂圖書出版公司，民國 85 年 3 月。
- 8.林慶元，「火災安全學講義」，1996 年。
- 9.堀內三郎，「建築防火」，朝倉建築工學講座 10，朝倉書店，1972 年 10 月。
- 10.陳弘毅，「消防戰術」，鼎茂圖書出版公司，1996 年。
- 11.龜井幸次郎、竹三謙三郎，「建築防災與都市防災」。
- 12.Johon Wiley and Sons,"An introduction to Fire Dynamics",1990.
- 13.張維能，「最新實用建築法規」，詹氏書局，民國 79 年 10 月。
- 14.「最新建築技術規則」，詹氏書局，1995。
- 15.黃世孟譯，「台灣都市計劃講習錄」，胡氏圖書。
- 16.吳讓治，「台灣地區建築物防火設計及檢驗規定之檢討與建議」，內政部營建署建築研究所籌備小組專題研究計劃成果報告，民國 77 年 2 月。
- 17.日本建築基準法，1995 年。

- 18.M.David Egan,"Concepts in Building Firesafety",1977.
- 19.E.G.Butcher and A.C.pamell,"Designing for Fire Safety",1983.
- 20.Jansson-Onnermark,"Flame Height Outside Windows",FOA Rapport,C 20445-A3,Mars,1982.
- 21.「建築防災」，中華民國建築師公會全國聯合雜誌，第 240 期，ISSN 1011-6818，1994 年 12 月。
- 22.「日本阪神大震災•震災應變及都市防災」，中華民國建築師公會全國聯合雜誌，第 243 期，ISSN 1011-6818，1995 年 3 月。
- 23.陳弘毅，「防火管理」，鼎茂圖書出版公司，1996 年。
- 24.蘇金佳、李漢齊譯，「工程熱力學」，徐氏基金會，民國 61 年。
- 25.張國標，「熱傳學」，全華科技圖書股份有限公司，民國 77 年。
- 26.J.P Holman,"Heat Transfer",Fourth Edition,1979.
- 27.宋佩瑄、黃新，「土木工程材料學」，大中國圖書公司印行，民國 78 年 8 月。
- 28.I.Oleszkiewicz,"Heater Transfer from a Window Fire Plume to a Building Facade",Fire Researchection ,Institute for Research in Construction ,National Research Council of Canada ,Ottawa ,Canada K1A 0R6.
- 29.Lin,Sugahara,Naruse,"Emergence-Limit of Flames from A Compartment Opening-A thought on some experimental results",Journal of Struct.Constr.Engng,AIJ,No.419,Jan.,1991.
- 30.黃林生，「不同耐燃裝修材料組合對封閉空間火災行為之影響」，碩士論文，台灣工業技術學院，1996 年 6 月。
- 31.M.Law,"Fire Sfety Of External Building Elements-The Design Approach",AISC Engineering Journal,Second Quarter,1978.

32. 「建築物之防火設計法之開發，出火擴大防止設計法之開發」，建設省建築研究所，昭和 62 年 3 月。
- 33.P.H.Thomas,"On FIRE Flame Out of Vertical Openings",Division of Building Fire Safety and Technology,Report Lutvdg/(Tvbb-3026),issn 0282-3756.
34. 「建築物室內傢俱燃燒特性之研究」，內政部建築研究所籌備處，民國 83 年 8 月。
35. 「總 3 階建 2x4 住宅十大火災實驗共同研究報告書」，建設省建築研究所，昭和 63 年 3 月。
- 36.Ohmiya、Sato、Tanaka、Wakamatsu,"Burning Range of Fuel in Enclosure and Generation Limit of the External Flame",J.Struct.Constr.Eng.,AIJ,No.469,149-158,Mar.,1995.
- 37.I.Oleszkiewicz,"Experimental Studies of Fire Spread along Building Facades", National Research Council of Canada,Institute for Research in Construction,Ottawa,Nov,1987.
- 38.S.Yokoi,"Study on the Prevention of Fire-Spread Caused by Hot Upward Current,Report of BRI,1960.
- 39.建築學大系 21 卷，「建築防火論」，彰國出版社，1976 年。
40. 「建築物之總合防火設計法」，第二卷出火擴大防止設計法，財團法人建築學會。
41. 「建築物之防火性評價」，清水建設株氏會社，昭和 61 年 3 月。
42. 「開口部材開發相關研究報告書」，財團法人建築學會，昭和 62 年 3 月。
- 43."Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures",NFPA,NO.80A,1975.
- 44.E.R.Galea,N.Hoffmann AND D.Berhane,"Large-Scale Fire Field Modelling",Oxford 1993 UK.

附件

第三案：建築物外牆開口與鄰棟間隔大小對火災延燒之影響

對於 86 年度期中簡報會議記錄之建議，已經在後續之實驗計劃中依照辦理。