

大空間建築性能式火災煙控系統設計規範之建立與應用分析手冊

內政部建築研究所協同研究報告

97 年度



大空間建築性能式火災煙控系統 設計規範之建立與應用分析手冊



內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 97 年 12 月

大空間建築性能式火災煙控系統 設計規範之建立與應用分析手冊



研究主持人：陳建忠

協同主持人：楊冠雄

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 97 年 12 月



目 錄

圖 目 錄	V
表 目 錄	XI
摘 要	XIII
Abstract	XVI
第一章 緒論	1
第一節 我國性能式煙控系統設計相關規範之發展現況	1
第二節 國外性能式煙控系統設計相關規範之發展現況	4
第三節 國際間最廣為應用之性能式煙控系統設計規範	7
第二章 自然蓄煙區之設計應用分析	
第一節 自然蓄煙區之設計理念分析.....	15
第二節 自然蓄煙區設計之常用手法與案例分析	15
第三節 小結.....	18
第三章 大空間自然煙控系統之設計應用分析	
第一節 設計理念分析.....	19
第二節 我國消防法規之相關規定.....	19
第三節 自然排煙口之設計方式與案例分析	21
第四節 小結.....	23

第四章 大空間機械煙控系統設計應用分析

第一節 設計理念分析.....	25
第二節 我國消防法規之相關規定.....	27
第三節 案例分析.....	28

第五章 挑空中庭及大型開闊空間之周圍區域區劃排煙系統設計應用分析

第一節 區劃排煙.....	37
第二節 利用天花層蓄煙之機械煙控系統設計.....	42
第三節 利用渠道導煙之機械煙控系統設計.....	45
第四節 小結.....	48

第六章 火災偵煙探測器之應用設計分析

第一節 各類型火災探測器工作原理簡介.....	49
第二節 我國消防法規之相關規定.....	51
第三節 煙氣層流現象對於偵煙探測器之影響分析及對策.....	54
第四節 火災偵煙探測器鳴動時間之全尺度實驗印證.....	58
第五節 火災偵煙探測器全尺度實驗之進行步驟.....	63
第六節 火災偵煙探測器全尺度實驗總結.....	66

第七章 排煙系統補氣之設計應用分析

第一節 設計理念分析.....	69
第二節 我國消防相關法規.....	69
第三節 大空間建築補氣設計之理論分析.....	70
第四節 自然排煙與補氣設計分析.....	76
第五節 機械排煙與補氣設計分析.....	79

第八章 性能式煙控系統設計 3D CFD 電腦模擬應用分析	
第一節 設計工具與方法使用之說明.....	81
第二節 設計案例性能比對.....	93
第三節 3D CFD 模擬結果比對分析.....	95
第九章 動態避難系統設計電腦模擬分析	
第一節 動態避難模擬分析簡介.....	101
第二節 以 SIMULEX 進行模擬之程序.....	105
第三節 煙控與避難性能比對分析.....	109
第四節 避難全尺度實驗印證.....	111
第十章 結論與建議	
第一節 結論.....	115
第二節 建議.....	10520
參考書目	123



圖目錄

圖 1-1 發煙量與火源大小及火場外氣進入量之關係.....	3
圖 1-2 澳洲建築法規煙控系統設計對照圖.....	5
圖 1-3 NFPA 92B 所定義之煙沉積示意圖.....	8
圖 1-4 NFPA 92B 之 N 百分比法則中煙層底部與 N 值關係.....	9
圖 2-1 大空間自然蓄煙區之設計理念示意圖.....	15
圖 2-2 L 大樓之挑空中庭(100 米)蓄煙區設計示意。以中庭頂部之圓頂做為蓄煙區之外，亦考量於頂上數層以防火鐵捲門於火災時形成密閉之防火區劃，做為蓄煙之方式。.....	16
圖 2-3 經初期 3D CFD 模擬結果顯示，原規劃之台北小巨蛋頂部蓄煙區不足，必須進一步加以修改設計，否則萬一發生火災時，人員之避難逃生時間將呈現不足。.....	17
圖 2-4 修改後之台北小巨蛋外型結構已具備良好而足夠之蓄煙區，可大幅延緩煙層積下降之速度，配合排煙系統之設置，大大增強了安全性。.....	18
圖 3-1 大空間自然排煙煙控系統示意圖.....	19
圖 3-2 高鐵左營站之自然煙控系統設計理念，充分利用大空間之蓄煙，並於頂部最高程部分設置自然排煙口，藉由底部之補氣形成推拉 (Push Pull) 之排煙形式。同時，原設計之自然排煙口總設置面積為樓地板總面積之 2%，經 3D CFD 電腦模擬結果而實際設計為 3.8%，大幅提升了其安全性。.....	20
圖 3-3 高鐵左營站將自然排煙口設置於中庭最頂端蓄煙區之頂部，可消除外界風向之影響。.....	21
圖 3-4 高鐵左營站於頂部設置自然排煙口縱深三百米以上，為國際間少見之設計，經全尺度性能驗證，性能優良。.....	21
圖 3-5 日本 Sunshine City 內部購物中心設置之滑動式自然排煙口可於發生火災時於一分鐘內打開變成透天厝，瞬間消彌火災風險於無形。.....	22
圖 3-6 日本福岡巨蛋為三萬五千人之表演場所，其頂蓋可旋轉打開。因此，於萬一發生火災時亦可急速消弭災害於無形。.....	23
圖 3-7 日本於 2000 年代初期大量興建此種滑動式頂蓋之大型購物中心或遊樂中心，其頂蓋接可兼具自然排煙效果。.....	23
圖 4-1 大空間機械排煙煙控系統示意圖.....	25
圖 4-2 大空間機械排煙運轉時，因風機啟動時機不當，產生拉穿現象。此時，溫度分層被破壞，導致氣流組織變成紊流，而快速下降。事實上，此時風機抽到的大部分是空氣，而非濃煙，排煙效率相當差。.....	26
圖 4-3 某高層建築頂部機械排煙機佈置情形。同時為增加其排煙性能之可靠性減少拉穿現象發生之機會，風機之啟動順序已預先排定並經全尺度實驗印證完成。.....	27
圖 4-4 桃園(中正)國際機場二期航廈出境大廳之挑高中庭形成良好之蓄煙空間，頂部並設置排熱與排煙兼用風機。.....	29
圖 4-5 桃園(中正)國際機場頂部風機佈設圖。此風機平時接受溫度感應器之訊	

號進行通風排熱，於萬一發生火災時，則轉變成全速運轉模式，為通風兼排煙之良好系統設計。.....	29
圖 4-6 桃園國際機場出境大廳頂部風機佈置實況。.....	29
圖 4-7 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗，之煙層積實況(一).....	30
圖 4-8 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗，之煙層積實況(二).....	30
圖 4-9 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗，之煙層積實況(三).....	31
圖 4-10 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗，之煙層積實況(四).....	31
圖 4-11 桃園(中正)國際機場二期航廈於 1998 年進行全尺度熱煙實驗之數據比對分析，顯示具備良好之煙控特性。.....	32
圖 4-12 台北某大型購物中心中庭頂部之蓄煙區與機械排煙系統設置示意圖.....	33
圖 4-13 台北某大型購物中心中庭進行 3D CFD 火災煙控電腦模擬分析結果.....	33
圖 4-14 台北某大型購物中心中庭進行全尺度火災煙控實驗結果分析，顯示優良之煙控性能，煙層淨高可維持於離地 50 公尺以上。.....	34
圖 4-15 台北小巨蛋應用自然蓄煙(1)，自然排煙(2)，機械排煙(3)，自然補氣(4)，樓梯間加壓(5)等先進技術，建構完成一個良好的大空間煙控系統設計.....	35
圖 4-16 台北小巨蛋之補氣不但提供煙控之推拉(Push Pull)助力，且其氣流方向正好與避難方向相反，對於人員之逃生避難提供了良好之保護。.....	35
圖 5-1 由居室本身的排煙系統排煙，不讓煙流入居室外之走廊，形成第一道防線.....	37
圖 5-2 一旦煙流出居室，再由走廊的機械排煙系統排掉，形成第二道防線.....	37
圖 5-3 典型平面式機械排煙系統設計平面圖.....	38
圖 5-4 平面式機械排煙系統風機之佈設，有可能暴露於火場之中，減低了系統之可靠性.....	39
圖 5-5 典型豎井式機械排煙系統設計平面圖.....	39
圖 5-6 豎井式機械排煙系統設計示意圖，其風機位於建築物的最頂端.....	40
圖 5-7 某捷運車站將月台層設計區劃排煙並設置專用排煙管之實況.....	41
圖 5-8 某捷運車站將穿堂層設計區劃排煙並進行兩區同時排放全尺度實驗之實況，實驗結果性能良好。於萬一發生火災後，6 分鐘內人員之避難動線一直維持良好之能見度。.....	42
圖 5-9 利用天花層蓄煙之機械煙控系統設計(Chambering Smoke Control System)示意圖.....	43
圖 5-10 某大型地下車站採用密閉天花與流明天花進行區劃排煙全尺度實驗發現，流明天花之方式由於具備良好之蓄煙效果，因此煙控性能較為優良。.....	44
圖 5-11 某車站於流明天花內部設置機械排煙風管，並充分利用蓄煙區之良好設計。.....	44

圖 5-12 某大型車站於流明天花內部設置機械排煙風管，並充分利用蓄煙區之良好設計示意圖。經進行區劃排煙全尺度實驗，獲得良好之成果.....	45
圖 5-13 煙導引渠道(Channeling Screen) 示意圖.....	47
圖 5-14 四樓出境大廳模擬結果顯示，有陰影區之部分皆為熱輻射強度大於..... 20kW/m ² ，必須注意處理。.....	48
圖 6-1 各類型探測器種類型之分類。.....	49
圖 6-2 差動式集中型熱探測器外觀.....	51
圖 6-3 差動式集中型熱探測器內部結構.....	51
圖 6-4 光電式集中型煙探測器外觀.....	52
圖 6-5 光電式集中型煙探測器之內部結構示意圖.....	52
圖 6-6 光電式分離型煙探測器外觀.....	53
圖 6-7 光電式分離型煙探測器偵測原理.....	53
圖 6-8 火焰探測器之外觀.....	54
圖 6-9 挑空中庭與大空間火災時所形成煙氣層流現象.....	55
圖 6-10 位於大空間底部之火源其產生煙柱之平均溫度圖.....	55
圖 6-11 大空間建築內裝置向上式之光束偵測網格.....	56
圖 6-12 某高鐵車站設置向上式之光束偵測網格示意圖.....	56
圖 6-14 空間建築內裝置水平式之光束偵測網格示意圖.....	57
圖 6-13 L大樓大空間建築內裝置水平式之光束偵測網格示意圖.....	58
圖 6-26 本實驗所安裝之儀器與設備配置示意圖.....	59
圖 6-18 本實驗所安裝使用之光電式分離型煙探測器位置示意圖.....	59
圖 6-19 第一組光電式分離型煙探測器於離地高 6 公尺處.....	60
圖 6-20 光電式分離型煙探測器第二組於離地高 21 公尺處.....	60
圖 6-21 本案所使用之集中型偵熱及偵煙探測器位置示意圖.....	60
下圖所示為於現場實際之探測器安裝位置。.....	61
圖 6-22 光電式集中型煙探測器於實驗場地之實際佈置圖.....	61
圖 6-23 差動式集中型熱探測器於實驗場地之實際佈置圖.....	61
圖 6-24 實驗裝置火警受信總機迴路端與探測器之連接示意圖.....	61
圖 6-25 本實驗所使用之數據存取記錄器與個人電腦.....	62
圖 6-26 裝設燈泡束以量測煙層高度於實驗場地之實際佈置圖.....	62
圖 6-27 實驗場地貓道上方之排煙系統實況圖.....	62
圖 6-28 火災探測器全尺度實驗排煙風機啟動時間示意圖.....	64
圖 6-29 火災規模為 5 MW 下，排煙量為 1.36 cmm/mP ^{2P} 之煙沈積與鳴動時間 對照圖.....	65
圖 7-1 「區域模式」之二層區域概念示意圖.....	71
圖 7-2 火場壓力中性面之示意圖.....	73
圖 7-3 壓力中性面約位於大空間建築之中間部位.....	74
圖 7-4 壓力中性面約位於大空間建築之上方部位.....	74
圖 7-5 壓力中性面下方之建築周圍空間將不易受到火災濃煙與高溫之侵入，可 確保避難逃生時之人身安全.....	75

圖 7-6 大空間建築設置自然排煙口與自然補氣口後之壓力分布特性圖.....	76
(資料來源：參考文獻 12)	76
圖 7-7 當補氣口較排煙口小之時，壓力中性面被拉升.....	77
圖 7-9 高鐵某車站利用電扶梯開口做為補氣通道，形成良好的推拉氣流組織....	77
圖 7-11 高鐵某車站利用大廳之正門開啟作為補氣通路之一，因此必須與偵煙 探測器連動於火災時開啟	78
圖 7-12 大空間建築設置機械排煙口與自然補氣口	79
圖 7-13 壓力中性面下方之空間將不會受到火災濃煙與高溫侵入，可確保避難 逃生拾之人身安全	80
圖 7-14 台北小巨蛋以逃生口位置進行補氣，正好與人之避難形成逆向，形成 良好之無煙避難路徑。	80
圖 8-1 輸入參數及建築外型等尺寸作為輸入檔.....	82
圖 8-2 定義計算範圍.....	82
格點若分得較細，模擬結果當然準確度較高，但也因此需較長之運算時間。反 之，若格點分的太大太粗糙，則精準度較差。因此，最佳之方式即為在火 源附近及開口部等邊界條件附近將格點加密，兼取運算速度與精度兩相平 衡。	83
圖 8-3 進行格點分析並求取最佳化之格點尺寸。常見之技巧為在火源附近及開 口部等邊界條件附近將格點加密，兼取運算速度與精度兩相平衡。	83
圖 8-4 性能式煙控設計常用 NFPA 92B 所列四種 t^2 火災成長曲線作為火源	84
圖 8-5 NFPA 92B 所列四種 t^2 火災成長曲線之成長係數表	85
圖 8-6 小巨蛋之 13 張座椅熱釋放率實驗結果顯示，其熱釋放率貼近 NFPA 92B 中之慢速與中速間。而原設計則為快速曲線，因此具有良好之工程安全預 度。	85
圖 8-7 輸入自然排煙口作為邊界條件之一	86
另一方面，補氣口位置及大小亦皆依此方式於 FDS 上形成邊界條件。	86
圖 8-8 輸入補氣口位置作為輸入條件之一	87
圖 8-9 輸入撒水頭之佈設做為邊界條件之一	87
圖 8-10 輸入熱電偶儀器樹做為邊界條件之一	88
圖 8-11 熱釋放率曲線比對圖	89
圖 8-12 典型之模擬結果溫度變化圖。右側之比例尺可調整依不同顏色顯示之 溫度值，因此本圖顯示火災發生後於 780 秒時，其濃煙溫度約為 70 度 C。	90
圖 8-13 3D CFD 模擬結果之溫度分布圖	91
圖 8-14 3D CFD 模擬結果之 CO 濃度分布圖	91
此可由能見度分布進一步印證。於避難路徑上離地 2.5 米以上之高度皆可為此 10 米以上之能見度，有利避難。	92
圖 8-15 3D CFD 模擬結果之能見度分布圖	92
圖 8-16 3D CFD 模擬結果之輻射熱強度分布圖	92
圖 8-17 兩種不同火災地點之選定建構成兩種之不同火災情境.....	94

圖 8-18 Case 1 與 Case 2 之溫度場比對分析 (續)	96
圖 8-19 Case 1 與 Case 2 之 CO 濃度場比對分析 (續)	97
圖 8-20 Case 1 與 Case 2 之煙層擴散比對分析 (續)	97
圖 8-21 Case 1 與 Case 2 之能見度比對分析 (續)	98
圖 8-22 煙層高度隨時間變化之曲線圖	99
圖 9-1 SIMULEX 模擬之人員平面圖	103
圖 9-2 Simulex 可自動選取避難人員超越之角度	104
圖 9-3 SIMULEX 模擬不同方向阻礙下之超越路線圖，可充分重現人們驚慌失措往不同方向避難之特性。	104
圖 9-4 步行速度與人員密度及間距之關係圖	106
圖 9-5 某高速鐵路車站避難路經之規劃與選定(1)	107
圖 9-6 某高速鐵路車站避難路經之規劃與選定(2)	107
圖 9-7 高鐵某車站之動態避難模擬實況	109
圖 9-8 人員避難至安全區之詳細人數動態統計圖	110
圖 9-10 Fire Scenario 1 抵達安全點之累計人數統計分析	110
圖 9-11 Fire Scenario 1 之煙控與避難性能比對分析	111
圖 9-12 淡水線 R14 中山站進行之 528 人之捷運地下車站避難實驗實況。	112
圖 9-13 台北捷運地下車站全尺度 528 人避難實驗與美國 SFPE 設計手冊比對結果相當準確，並顯示人員密度與避難步行速度呈現直接反比。此結果與 SIMULEX 所內建之避難性能曲線亦相同。	113



表 目 錄

表 1-1	發煙量與煙層淨高之關係表	4
表 1-2	美國 BOCA 建築法規煙控系統設計對照表	6
表 1-3	本案之煙控系統性能模擬結果之判定基準	11
表 1-4	人員暴露於火場進行避難所能容忍之時間與其周圍之空氣 溫度之關係.....	12
表 1-5	人員暴露於火場進行避難所能容忍之時間與其周圍之熱輻 射強度之關係.....	12
表 1-6	人員暴露於火場進行避難所應具有之能見度	12
表 6-1	各裝置場所高度所設置之探測器類型	50
表 6-2	火災規模為 5 MW 之探測器鳴動時間實驗結果.....	64
表 7-1	「條例式設計」與「替代方案設計」之模擬輸入條件	94
表 8-1	Simulax 輸入不同人員屬性時之男女老幼組成百分比.....	105
表 9-2	高速鐵路某車站動態避難模擬案例表	108



摘要

關鍵詞：性能式設計、3D CFD 電腦模擬、煙控系統設計、動態避難分析

一、研究緣起

近年來，我國大量興建大型購物中心、大型都會區捷運系統車站、高速鐵路系統車站與機場航廈等，具備挑高中庭及大空間之建築物。這些建築物，由於平時人潮洶湧，且各類店鋪種類繁多，發生火災之風險極高，尤其煙控策略之成敗更為保障人員避難安全之關鍵因素所在。我國目前施行之條例式消防法規若強制套用於此類建築物上，經常發現適用上之困難，而必須進行性能式設計以求取煙控系統性能及造價之平衡點。

二、研究方法與過程

故本研究首先將收集國外煙控系統補氣設計資料，進行分析補氣系統之最適化設計。此種性能式煙控系統設計方法，主要著眼點為假設火災發生於挑高中庭正下方，而火災發生之濃煙以「自然模式」(Free-plume) 類似蕈狀雲之方式成長，再於頂部蓄積，並經由機械或自然排煙之方式控制濃煙下降之速度，以利人員逃生。為進行精確而數量化之分析便必須應用 3D CFD 電腦模擬進行火場溫度與速度分佈、CO 濃度與能見度分佈、煙層下降速度等分析，以評估可控制煙層於人員呼吸線淨高以上之時間，再以動態避難模擬分析所必要之避難時間，以此二時間之比對來判定是否安全。

此種設計方式經廣泛應用於我國之桃園國際機場二期航站、京華城購物中心、自由時報總部大樓、台北小巨蛋、以及高速鐵路車站台北站、板橋站、桃園站、台中站、嘉義站、台南站、及左營站、及台鐵左營新站等大空間建築，獲得相當優良之成效。同時，為了進一步印證其性能，皆進行全尺度實驗印證，性能良好。

三、重要發現

為傳承此寶貴之經驗，本手冊將我國近十年來所完成之大空間建築性能式煙控系統案例進行詳細之分析。經由每項主題設計理念之闡述、我國消防法規之相關規定及案例分析與結果，做詳盡之剖析，以求進一步之推廣應用。

展望未來，隨著我國經濟之進一步發展，具備挑高中庭與大空間之建築將更為普遍，進行性能式煙控系統設計與避難分析更形必要，本手冊或將提供一有用之指引，使設計更趨完善，性能更為良好。

四、主要建議事項

建議一

立即可行建議— 大空間建築性能式火災煙控系統設計應用分析之推廣

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、中華民國建築學會

本研究計畫之成果將編輯成為「大空間建築性能式火災煙控系統設計規範之建立與應用分析」手冊，由內政部建築研究所加以出版。並經由財團法人台灣建築中心與中華民國建築學會等單位進行建築師、消防設備師、冷凍空調技師、電機技師等之教育訓練，以進一步推廣應用。

建議二

中長期建議— 大空間建築性能式火災煙控系統設計規範之建立

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、內政部消防署

目前我國相關煙控系統之規定，僅見於「各類場所消防安全設備設置標準」，並無針對挑空中庭及大型開闊空間等建築物有專章規定。未來針對大空間建築煙控系統設計之中長期建議，可根據本計畫完成之相關結果，建立屬於我國本土是用的大空間建築性能式火災煙控系統設計規範。如此，對於我國於大空間建築性能式火災煙控系統之設計推廣，將為良好之指引，並形成深遠之影響。

Abstract

Keywords: Performance-based design guide, 3D CFD Simulation, Smoke Management System Design, Dynamic Egress Analysis

In recent years, huge shopping malls and atrium buildings were constructed densely in Taiwan. These buildings, with high atria and large spaces, were also with high fire risk where smoke management strategies become the dominant factor. In this case, performance-based design provides a good balance between the cost and engineering practicality.

The design concept is normally by assuming that fire occurred underneath the atrium where smoke was generated like a free-plume, stored in the smoke reservoir and then descended with a controlled rate by the smoke management systems, while people can be evacuated safely as shown in figure 1.

In an attempt to analyze the smoke management system performances precisely, 3D CFD analysis is usually performed to analyze the distribution of temperature, velocity, CO concentration, visibility, and smoke descending rate, etc. of a defined fire size so that acceptable clear height can be maintained. Dynamic egress analysis is then performed to compare with the time allowed to validate the result. The CKS airport terminal II, CP Mall, Liberty Times Headquarter, Taipei Arena, High Speed Rail Stations, such as, Taipei, Banciao, Tuaoan, Taichung, Tainan,

ChiaYi, Tsoying Stations, and TRA Zuoying station, were all designed following this design concept. In validating their design performances, full-scale hot smoke tests had been conducted with successful results.

It is the goal of this manual to integrate the technology developed during these years and compile it into a design guide. It is anticipated that this manual will provide a profound performance-based smoke management system design guide for actual fire engineering practices to facilitate better design projects in the future in Taiwan.





第一章 緒論

近年來，台灣地區陸續完工啟用許多大型/公共建築物，為講求讓使用者有明亮、舒適的感覺，常於中設計具備中庭或挑高與開闊空間。而於這類地方，又常是人群眾多聚集之地，故其火災緊急時之煙控性能要求便為非常重要。

目前我國現行消防法規中，有關煙控系統部分，僅見於「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條中有相關規定。於條文中規定防煙區劃面積大小、防煙壁下垂之深度、排煙口位置與排煙量大小等等設計，此為典型條例式 (Prescription) 法規之規定。

但事實上，各類場所消防安全設備設置標準 188 條主要為適用於居室部分之煙控系統設計。對於具備中庭或挑高與開闊空間部分之購物中心、航站大廈與地下車站等建築物而言，直接套用類似之條例式法規，作為其煙控系統設計之依據並不適宜。

1.1 現行法規制度面之不足

目前我國各類建築物建造時所遵循的火災安全法規，為民國八十五年三月內政部所頒佈的「各類場所消防安全設備設置標準」。本法規共分三編，除第一編【總則】外，主要內容為第二編【消防設計】與第三編【消防安全設備】。但由於內容規定過於籠統，涵括各種不同用途型態之建築物，因而造成實際設計者無所適從。

「各類場所消防安全設備設置標準」第 12 條中規定，各類建築物依其用途可分為甲、乙、丙、丁、戊、與己六類場所。即先確定建築物之類別後，則可依規定設置每類場所之消防設備。但因「各類場所消防安全設備設置標準」對於各種建築物分類過於粗糙，以致造成設計上的困擾。例如於乙類場所中包含：

- (一) 車站、飛機場大廈、候船室。
- (二) 期貨經紀業、證券交易所、金融機構。

- (三)感化院、學校教室、補習班、訓練班。
- (四)圖書館、博物館、美術館、陳列館、史蹟資料館、紀念館及其他類似場所。
- (五)寺廟、宗祠、教堂、靈骨塔及其他類似場所。
- (六)辦公室。
- (七)集合住宅、寄宿舍。
- (八)體育館、活動中心。
- (九)室內溜冰場、室內游泳池。
- (十)電影攝影場、電視播送場。
- (十一)倉庫。

顯然我國現行消防法規中對於建築型態之認定，像車站、機場大廳等建築，居然與辦公室或住宅等建築屬於同一種類。事實上，對於具備中庭或挑高與開闊空間部分之車站、航站大廈與體育館等建築物而言，實不適合使用與辦公室或住宅等建築類似之消防法規，作為其火災煙控與避難系統設計之依據。

因此，就上述現象而言，目前我國「各類場所消防安全設備設置標準」此種條例式法規，只單單就建築使用用途分類且分類又現粗糙，並無就各種不同建築型態，如一般居室、挑高中庭等，進行不同特性之歸納。此即我國目前火災安全法規之法規面不足處。

1.2 現行法規技術面之不足

目前我國火災安全法規，除了如上述之缺點，以單一法規涵蓋所有建築物外，於設計技術方面之規定亦非常缺乏。

如「各類場所消防安全設備設置標準」中之第三編【消防安全設備】，並無陳述任何相關設計技術面之條文。亦即只列出設備規格，並無任何設計手法說明，與任何系統性能之要求。故在某些建築場合設置時，可能造成雖合於法規對於消防設備設置數量上之要求，但實際上於發生火災時，並無法真正保障人身安全。

舉例而言，於「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條第 7 款中規定：「前款之排煙機應能隨任一排煙口之開啟而動作，其排煙量不得小於每分鐘 120 立方公尺，且在一防煙區劃時，不得小於該防煙區劃面積每平方公尺每分鐘 1 立方公尺，在二區以上之防煙區劃時，應不得小於最大防煙區劃面積每平方公尺每分鐘 2 立方公尺。但地下建築物之地下通道，其總排煙量不得小於每分鐘 600 立方公尺。」，故照目前我國現行法規中規定之排煙量，被認為跟樓地板面積成直接正比例關係。此於大空間建築煙控系統設計上，將產生嚴重的誤導！

事實上，火場的排煙量應直接正比於發煙量。當每單位時間之排煙量大於每單位時間之發煙量時，配合防煙區劃、防煙垂壁或灑水系統之設置，則火場產生的煙可由排煙系統所控制。而將煙限制在火場房間天花板下某個高度內，維持煙層底下之無煙明確的逃生通道。反之當排煙量小於發煙量時，則火場的煙可能逐漸往下蓄積，影響人的逃生。

1.3 發煙量與火源大小之關係

發煙量與火源大小及火場外氣進入量有密切關係。在設計上而言，就是其火源周長 P (Perimeter of Fire) 與煙層 (Smoke Layer) 離地板高度 Y ，決定了發煙量 Mm ，如圖 1-1 所示。

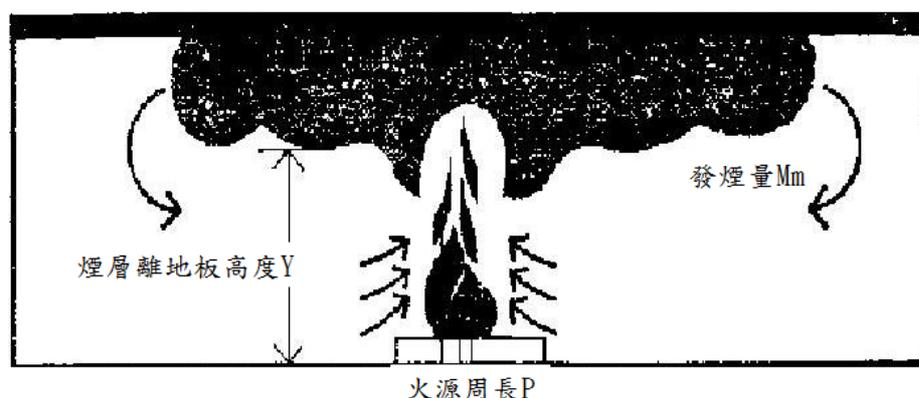


圖 1-1 發煙量與火源大小及火場外氣進入量之關係

而發煙量可用以下式子表示：

$$M_m = 0.2 P Y^{3/2} \quad (1-1)$$

其中 M_m 為每秒所產生煙的質量數， P 為周長、 Y 為煙層底部至樓地板之淨高，單位公尺。發煙量亦可以體積表示，則每秒產生立方公尺煙 M_v 可寫成：

$$M_v = \frac{M_m}{1.22 \times (290 / T + 273)} \quad (1-2)$$

舉例而言，假設一寬 20 公尺、長 30 公尺及高 3.5 公尺的空間，則依據我國「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條第 7 款規定在其內裝置排煙設備，其機械排煙量為 $600 \text{ m}^3/\text{min}$ 。若發生 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 之 5 MW 的火災，火場溫度為 200°C 時，大概只能勉強維持約 2 公尺的淨高。但隨著火場溫度提高時，甚至火源變大時，其排煙煙控系統所能維持的淨高就愈低，人就愈加危險了。因此，以樓地板面積直接來換算所需的排煙量的確不合宜，甚至造成排煙系統設計量之誤判。

表 1-1 發煙量與煙層淨高之關係表

Y(m)	M(kg/sec)	M(m^3/min)		
		500°C	200°C	25°C
1	2.4	314.4	193	121.3
15	4.41	577.7	355.2	222.9
2	6.79	889.5	546.8	343.2
25	9.49	1243.2	764.3	479.7
3	12.5	1637.6	1066.7	631.8

以此表而言在相同之樓地板面積下因不同之淨高將具備不同之發煙量，其相異甚至可達五倍之多，然而依據目前國內之消防法規卻必須設置相同之排煙量。此於大空間建築中更是明顯。

1.4 國外性能式煙控系統設計相關規範之發展現況

在國外先進國家有關煙控系統設計之規定，並非將所有建築型態，以單一法規（例如各類場所消防安全設備設置標準 188 條）全盤規定其煙控系統設計，

而是以圖表或另訂定特別法，以充分考慮其建築特性對煙控系統設計的影響，亦即提供性能式法規之設計依據。

於澳洲建築法規 (Building Code of Australia)，其排煙系統設計 (Smoke Exhaust Systems) 為採用圖表對照方式，來規定各種不同火載量下，不同建築型態與有無撒水系統 (Sprinkled)，於維持不同淨高之排煙量大小 (Smoke Exhaust Rate)。

其所規定的設計基準 (Design Criteria) 為：機械排煙系統必須能夠保持蓄煙區 (Smoke Reservoir) 之煙層底部，離樓地板至少 2.1 公尺以上。其各種狀況相對應之排煙量設計，如圖 1-2 所示。

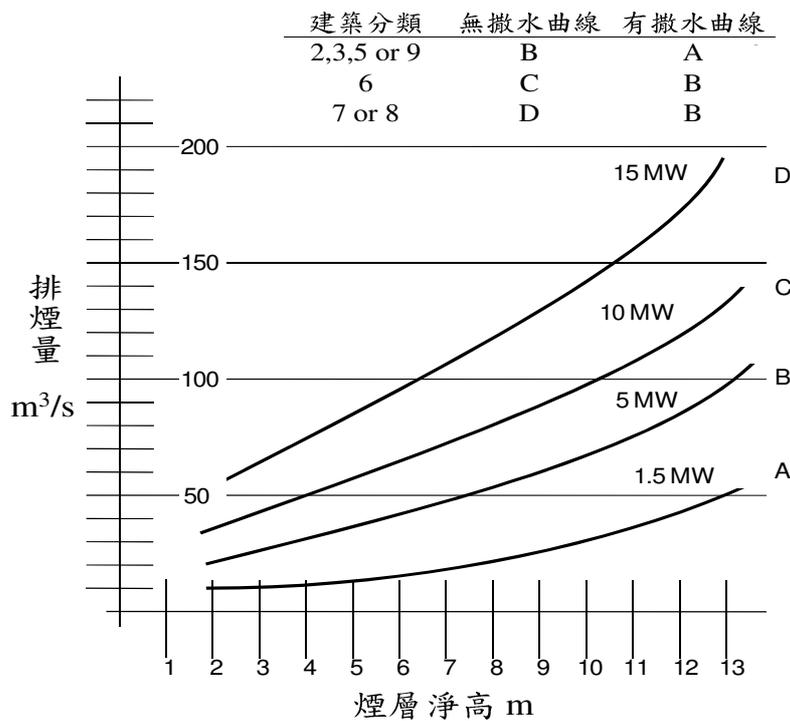


圖 1-2 澳洲建築法規煙控系統設計對照圖

另外，於美國建築法規 (The BOCA National Building Code) 其第九章建築物防火系統 (Fire Protection Systems) 中，有關煙控系統排煙量的設計為使用表格對照方式，以供設計者選擇最適合建築物採用的最小排煙量。

其所規定的設計基準 (Design Criteria) 為：煙控系統必須能夠保持煙層底部 (Smoke Layer Interface) 在以下任一高度以上，一為鄰接其他空間的開口部之最上方，二為中庭內最高出口樓地板上方 6 ft，並持續 20 分鐘以上。另外，中庭內必須有至少每小時 2 次換氣率 (ACH) 的自然或機械排煙系統。

其煙控系統設計程序，首先考慮自然式煙控系統設計。若可以滿足上述設計基準，則可不用裝置機械排煙系統。自然式煙控系統能否滿足設計基準，則用下列式子判斷：

$$Z = 0.67H - 0.28 \ln \left[\frac{t \cdot Q^{1/3} H^{2/3}}{A} \right] \quad (1-3)$$

其中，Z 為淨高、t 為時間為時間、H 為中庭高度、Q 為火載量、及 A 為中庭截面積。若自然煙控無法滿足設計基準，則再進行機械式煙控系統設計。而其排煙量設計，則可從圖 1-3 對照到最適合各類型建築物所採用的最小排煙量。

表 1-2 美國 BOCA 建築法規煙控系統設計對照表

Z/H	t / t ₀					
	V / V _e					
	0.25	0.35	0.50	0.70	0.85	0.95
0.2	1.12	1.19	1.30	1.55	1.89	2.49
0.3	1.14	1.21	1.35	1.63	2.05	2.78
0.4	1.16	1.24	1.40	1.72	2.24	3.15
0.5	1.17	1.28	1.45	1.64	2.48	3.57
0.6	1.20	1.32	1.52	2.00	2.78	4.11
0.7	1.23	1.36	1.61	2.20	3.17	4.98
0.8	1.26	1.41	1.71	2.45	3.71	6.25

符號說明

Z	設計之煙層高度，m
H	火源上方天花板淨高，m
t	煙沈積之 Z 處所需時間，sec
t ₀	無排煙時之 t 值
V	排煙量，m ³ /s
V _e	發煙量，m ³ /s

以上為澳洲與美國有關煙控系統設計的法規。可明顯看出，兩種法規皆充分考慮建築物特性，如自然排煙、蓄煙區、中庭等等。也將性能式設計方法列入考慮，如煙層底部高度計算、每小時換氣率、不同狀況相對應之排煙量設計等等。此即我國目前火災安全法規技術面不足之處。

1.3 國際間最廣為應用之性能式煙控系統設計規範

目前於國外先進國家中有關挑空中庭及大型空間開闊空間建築物之煙控系統性能安全設計，以美國、澳洲及英國之發展最為快速。其中美國之 NFPA 92B, “Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas.” 規範，或者更貼切的，說設計指引，被視為最具權威性。全文共分為六個章節，包括：

1. 通論
2. 設計理念分析
3. 計算程序分析
4. 煙控設備控制
5. 系統運轉測試
6. 相關資料及附錄。

訂定本法規主要目的為，提供大空間內既有或全新之煙控系統有關設計、安裝、測試、運轉與維護等技術資料，以保障火災時，確實於大型空間及其連接處一個無煙的逃生路徑。NAPA 92B 其理論分析、實際運用與實驗應證等三方面兼具，為目前少數對具備中庭或挑高與開闊空間建築物煙控系統做系統化研究之一。

其次，英國 BRE 之“Design Approaches for smoke Control in atrium Buildings.”，亦對大空間煙控系統做深入研究。本準則共分八章，針對具中庭建築物之煙控系統設計，從煙流特性、火載量設計、系統設計理念、乃至中庭自然排煙/機械排煙之應用，皆有詳細解說與設計程序。亦為一完整之大空間煙控系統設計準則。

1.4 NFPA 92B 對煙層高度的評估方法

於工程實務上廣用之煙層判定方法有二：一為透過燈泡束，以肉眼或攝影機觀察煙層高度，其二為藉由熱電耦儀器與數據存取記錄器所收集的火場溫度數據，進行煙層判定。此為 NFPA 92B 所引進之方式，又稱為 N% 方法。

NFPA 92B 對於煙層於大空間蓄積之過程提出一簡化之區域模式，如圖 1-4 所示。當煙層開始沈積時，會形成有煙之高溫區與無煙之低溫區。同時，在高溫煙層與低溫空氣層之間存在一過渡區域（Transition Zone），而此過渡區域底部高度即被稱為初步煙層位置（First Indication of Smoke）。

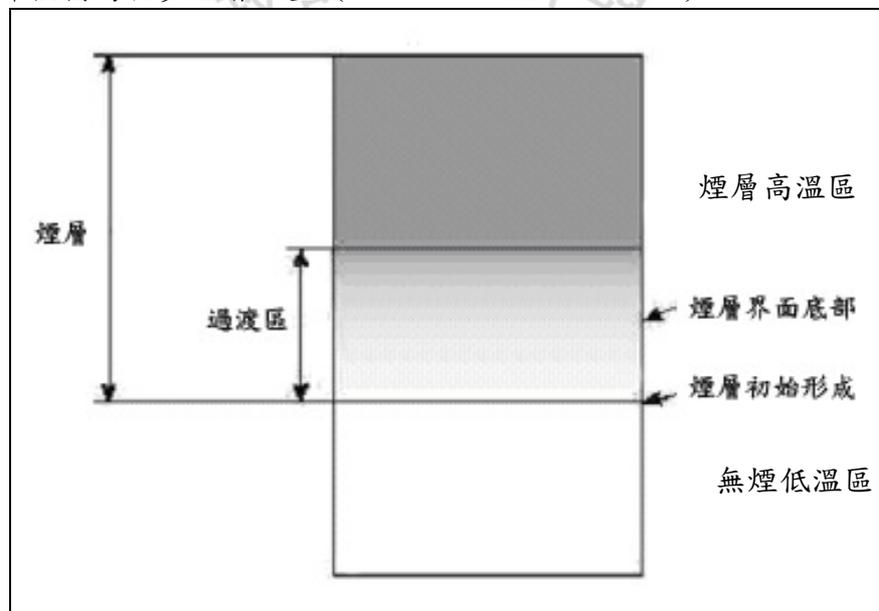


圖 1-3 NFPA 92B 所定義之煙沉積示意圖

採取 NFPA 92B 之 N 百分比法則（N-percentage Rule）來判斷煙層的高度，乃依據煙層與周圍間空氣之溫度差取一百分比 N 進行計算，其公式如下所示：

$$T(z_i, t) - T_{\infty}(z_i) = N \Delta T_{ref}(T) / 100$$

其中，

T = 煙層溫度(°C)

T_∞ = 環境溫度(°C)

ΔT_{ref} = 煙柱與環境之溫度差(°C)

N = 百分比(%)

Z_i = 煙柱底部離地面之淨高(m)

T = 時間(s)

舉例而言，當煙層之溫度為 60 度 C 而大空間之環境溫度為 30 度 C，二者溫差為 30 度 C。若取 N 值為 60% 則與環境溫差 18 度 C 之處即為煙層底部位置。此相當於煙層內部 48 度 C 之處，只要與溫度儀器樹量測之結果比對即可輕易獲得，於工程應用上極為實用。

NFPA 92B 中指出，一般判斷煙層底部 (Smoke Layer Interface) 的 N 值取 80~90。某些設計案為求較保守之估計，將煙層底部之 N 值訂為 60 甚或更低，作為煙層之判定標準，如下圖 1-5 所示。就物理現象而言其煙層下降速度更快。

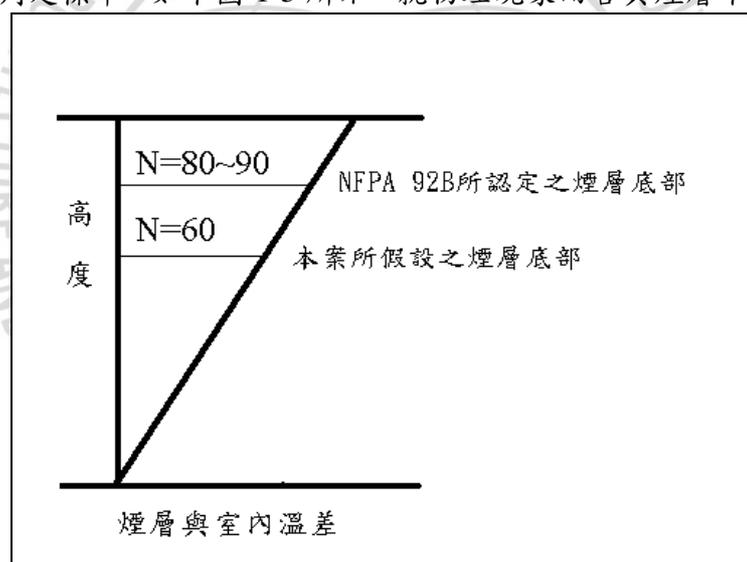


圖 1-4 NFPA 92B 之 N 百分比法則中煙層底部與 N 值關係

以上國外先進國家之研究成果，一方面凸顯此種中庭及大空間煙控系統設計規範之重要性外，亦成為此種設計之主要參考依據。

1.5 煙層控制與安全之判定原則

進行挑空中庭及大型開闊空間建築物煙控系統設計時，其主要的設計目標如下所示，重點為：

1. 保持煙層底部於預先決定之高度,一般為最高程人員站立後之呼吸線高度以上,再酌加安全裕度。
2. 提供充分之時間,維持無礙之避難路徑與情況 (Tenable Condition),使人員到達出口或避難區域。此條件共分為五大要項:

本手冊所引用之煙控系統性能判定基準(Criterion),主要為依據 NFPA 130 (2007 年版)之建議,內容包括:

(1) 溫度:

火場溫度在數秒內允許之最高溫為 60 °C,最初 6 分鐘允許暴露之平均溫度為 49 °C。本模擬旅客在數秒內通過火場,以 60 °C 為判定基準。

(2) CO 濃度:

在數秒內允許之最高濃度為 2,000 ppm,最初 6 分鐘暴露平均濃度不大於 1,500 ppm,最初 15 分鐘暴露平均濃度不大於 800 ppm,其餘條件暴露平均濃度不大於 50 ppm。本模擬採濃度小於 1,500 ppm 為判定基準。

(3) 能見度:

煙之能見度要求,在有照明 (80 lux) 的避難標誌,能辨視的距離為 30 m,門及牆壁能辨視的距離為 10 m。本案採 10 m 能見度為判定基準。

能見度為視力所能辨視之最遠距離。當光線通過火場,強度受到煙的阻擋而衰減,其計算方法為:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-KL} \quad (1-28)$$

I : 光經一段路徑後之剩餘強度, cd

I_0 : 光之初始強度, cd

K 為光衰減係數 (Light Extinction Coefficient, m^{-1}), L 為距離 (m), 則能見度 (S) 的估算,可依下列公式計算:

$$S = C / K \quad (1-29)$$

有照明的避難標誌，如避難方向指示燈，較易為眼睛所看到，C 值取為 8。而反光式的避難標誌或一般之地板壁面，則 C 值為 3。本模擬以 C 值取為 3，並以動態模擬繪出能見度分布

(4) 輻射熱強度：

關於輻射熱 q'' (Radiation Heat Flux) 部份，在數秒內允許暴露值最大為 $6,305 \text{ W/m}^2$ ，最初 6 分鐘允許暴露平均強度 $1,576 \text{ W/m}^2$ ，其餘條件之暴露平均強度為 946 W/m^2 。

旅客經過火場時接受到最大輻射強度，僅為數秒的時間，故以 $6,305 \text{ W/m}^2$ 或 6.3 kW/m^2 來考慮。

(5) 煙層底部

此項目參酌相關設計規範，將煙層底部訂於不得低於 1.8 公尺。

因此，依據以上所述，本案相關之煙控系統性能模擬結果之判定基準，整理如下表 1.2 所示。

表 1-3 本案之煙控系統性能模擬結果之判定基準

項 目	判定基準
逃生空間溫度	$< 60^\circ\text{C}$
CO 濃度	$< 1500 \text{ ppm}$
能見度	$> 10 \text{ m}$
輻射熱強度	$< 6.3 \text{ kW/m}^2$
煙層淨高	離地 1.8 m 以上

(1) 避難路徑上之空氣溫度不得高於 60°C

據國外資料顯示人員暴露於火場進行避難所能容忍之時間與其周圍之空氣溫度有絕對之關係。如下表所示

表 1-4 人員暴露於火場進行避難所能容忍之時間與其周圍之空氣溫度之關係

Temperature / Humidity Conditions	Tolerance Time
< 60°C saturated	> 30 min
60°C, < 1% H ₂ O	12 min
180°C, < 1% H ₂ O	1 min

(2) 避難路徑上之熱輻射強度應控制於 2.5kW/m² 以下

表 1-5 人員暴露於火場進行避難所能容忍之時間與其周圍之熱輻射強度之關係

Radiation Intensity	Tolerance Time
< 2.5 kW/m ²	> 5 min
2.5 kW/m ²	30 sec
10 kW/m ²	4 sec

(3) 人員暴露於火場進行避難所應具有之能見度一般應大於 10m。

表 1-6 人員暴露於火場進行避難所應具有之能見度

Location	Minimum Visibility	Equivalent Optical Density (m ⁻¹)	Equivalent Optical Density (db/m)
Small rooms	5 m	0.2	2.0
Other rooms and spaces	10 m	0.1	1.0

(4) CO 濃度：

在數秒內允許之最高濃度為 2,000 ppm，最初 6 分鐘暴露平均濃度不大於 1,500 ppm，最初 15 分鐘暴露平均濃度不大於 800 ppm，其餘條件暴露平均濃度不大於 50 ppm。一般模擬採濃度小於 1,500 ppm 為判定基準。

(5) 煙層底部淨高

此項目一般設計規範，將煙層底部訂於不得低於 1.8 公尺，乃考慮人之呼吸線位置。因此亦有較嚴格之規定，為離地 2.1 公尺。

以上五項安全之判定準則已經於我國所進行之數十個大空間建築煙控系統設計案例實證過；包含：中正機場二期航廈、京華城購物中心、自由時報企業總部、台北小巨蛋、台灣高速鐵路台北站、板橋站、桃園站、台中站、嘉義站、台南站以及左營站、台鐵左營新站、高雄捷運 O5R10 車站、R9 車站等甚至台積電、聯電等之大型無塵室進行實際之應用，並獲得良好之成果。

尤其，高雄都會區捷運系統等為數約數十個地下車站進行煙控與避難系統電腦模擬時，亦皆以此為判定基準，可謂為我國本項技術光輝的一頁，與國外新進國家之工程技術比較，亦不遑多讓。

以下即分就大空間煙控系統之設計要項進行討論。



第二章 自然蓄煙區之設計應用分析

1. 自然蓄煙區之設計理念分析

當大空間內部發生火災時，火焰產生的煙柱(Plume)受浮力驅動而上升。煙柱捲入周圍的空氣，而煙量則隨著煙柱上升高度而增多；直到大空間挑空中庭頂部或天花板時，煙開始於大空間內部自然填充(Smoke Filling)，並慢慢沈積形成煙層(Smoke Layer)。此時，若於大空間挑空中庭頂部設置蓄煙區(Smoke Storage)，如圖 2-1 所示，則能減緩煙層下降速度，以提供一條無煙之逃生避難路徑。

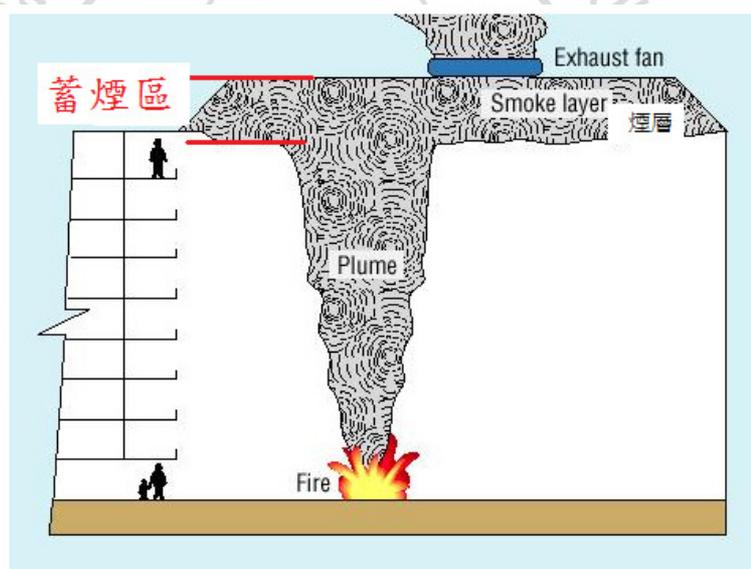


圖 2-1 大空間自然蓄煙區之設計理念示意圖

2. 自然蓄煙區 (Smoke Storage) 設計之常用手法與案例分析

蓄煙區之設計為延緩煙沉積速度之最重要手段之一。常見之蓄煙區設計除設置於大空間頂部外，亦可配合大空間周圍區域之防火/防煙區劃設計，擴大蓄煙區之容量。常見之方式為大空間挑空中庭周圍全面以防火鐵捲門形成密閉蓄煙區設計，然其高昂的造價及易誤動作之問題必需考量。

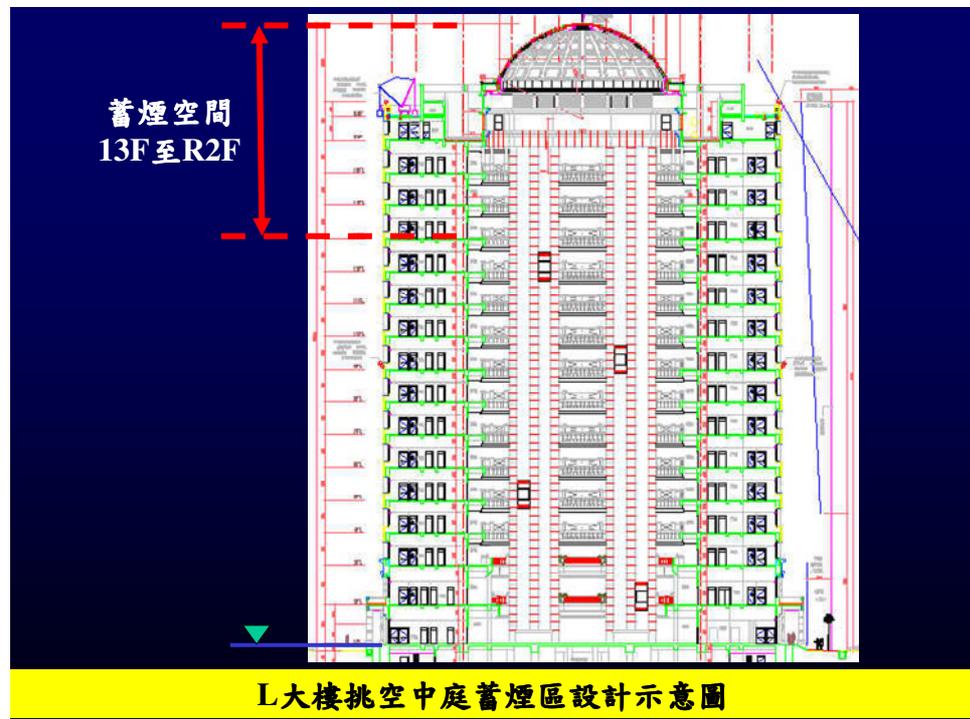


圖 2-2 L 大樓之挑空中庭(100 米)蓄煙區設計示意。以中庭頂部之圓頂做為蓄煙區之外，亦考量於頂上數層以防火鐵捲門於火災時形成密閉之防火區劃，做為蓄煙之方式。

另以台北小巨蛋為例；建築師原設計之蛋型較為扁平，同時左側高層之觀眾座位區大幅拉高，形成不對稱之形狀，示如下圖 2-3。經初期進行 3D CFD 火災模擬結果顯示，若於主館發生 5 MW 火災，經過 100 秒後整個蓄煙區已充滿濃煙。於 180 秒後濃煙已瀰漫至最高層之座位區上方繼續蓄積，而於 210 秒後整個座位區已籠罩在濃煙之中，人員逃生極為困難，造成極大之危險，顯示原規劃之蓄煙區容量不足。

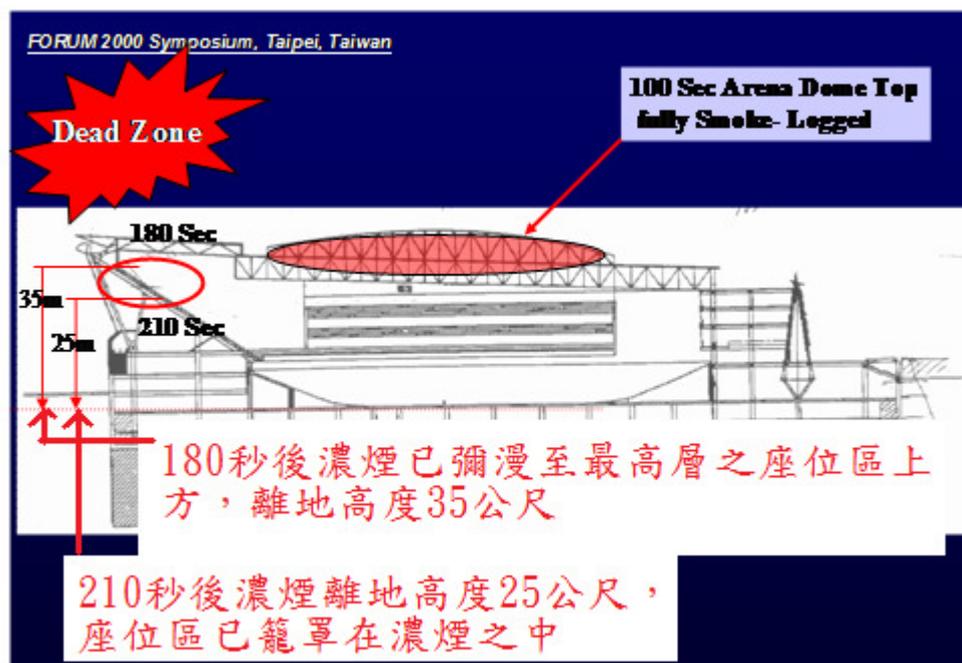


圖 2-3 經初期 3D CFD 模擬結果顯示，原規劃之台北小巨蛋頂部蓄煙區不足，必須進一步加以修改設計，否則萬一發生火災時，人員之避難逃生時間將呈現不足。

經建議修改設計後，完成之蛋形如下圖 2-4 所示，此即為台北小巨蛋之現況。進一步經 3D CFD 電腦模擬結果顯示，更廣大之蓄煙區配合機械排煙與自然排煙系統之設置，可於最高層座位區上方維持 7 公尺高度之無煙淨空持續達 30 分鐘以上；此與巨蛋內一萬五千名觀眾總避難時間 14 分 36 秒比較，具 2 倍左右之安全裕度，大大提升了安全性。

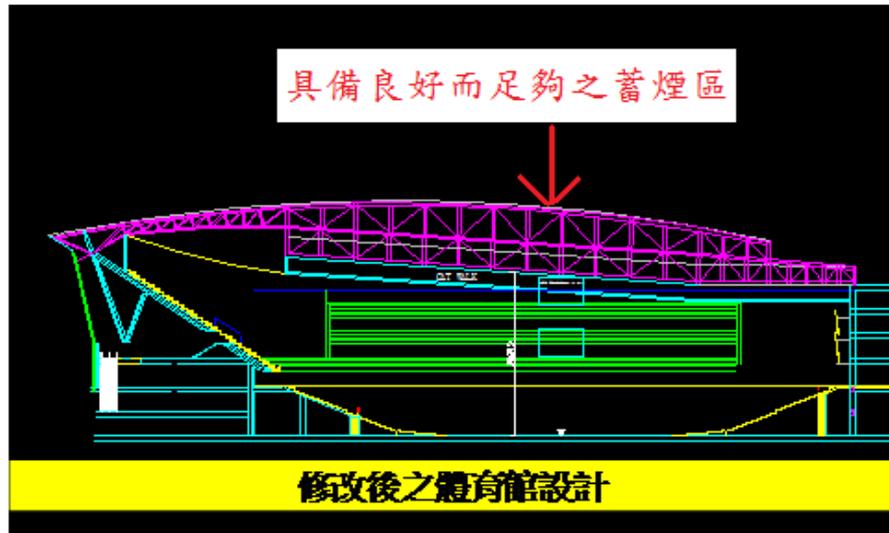


圖 2-4 修改後之台北小巨蛋外型結構已具備良好而足夠之蓄煙區，可大幅延緩煙層積下降之速度，配合排煙系統之設置，大大增強了安全性。

此種由於 3D CFD 之分析而導致整個巨蛋球場之重新設計，一方面顯現了蓄煙區重要性；另一方面，亦顯示出防火避難安全設計乃所有新工程建造流程中不可或缺的一環。

3.小結

大空間內部之蓄煙區設計，其作用除了能減緩煙層下降速度以外，更可提供自然或機械排煙煙控有利的條件。此乃考量一旦火災自探測器偵知到連動至火警警報器，通知防災中心，再以自動或手動方式啟動自然排煙口或排煙風機，到風機全速運轉之階段，需要一段時間才能達成。因此，若有蓄煙區之設計，則蓄煙空間既可用以緩衝排煙口或排煙風機尚未完全開啟運轉前之時段，提供人員早期避難之需，且不至於形成排煙機過早啟動所形成之拉穿效應(Plug-holing)，而使煙層快速下降。

蓄煙區的設計除了配合大空間周圍區域之防火/防煙區劃設計外，亦應考慮煙層溫度對蓄煙區完整的影響。如蓄煙區以玻璃隔開挑空中庭與其周圍區域，則可考慮於區劃玻璃兩側加裝撒水系統，以隔絕高溫的煙層。

大空間蓄煙煙控設計可不用電力而運作，故萬一火災斷電時，仍可發揮煙控性能，煙控性能可靠，具備“萬一失敗時仍然安全”(Fail-Safe)的優勢。

第三章 大空間自然煙控系統之設計應用分析

1. 設計理念分析

典型挑空中庭及大型開闊空間建築物之自然排煙煙控系統設計理念，可示如圖 2-5。在圖中，於挑空中庭之頂部設計凸出的屋頂「頸部」，形成蓄煙空間設計，再經由偵煙探測器與自然排煙口之連動將煙排出而控制濃煙於一定之高層，以利人員避難。

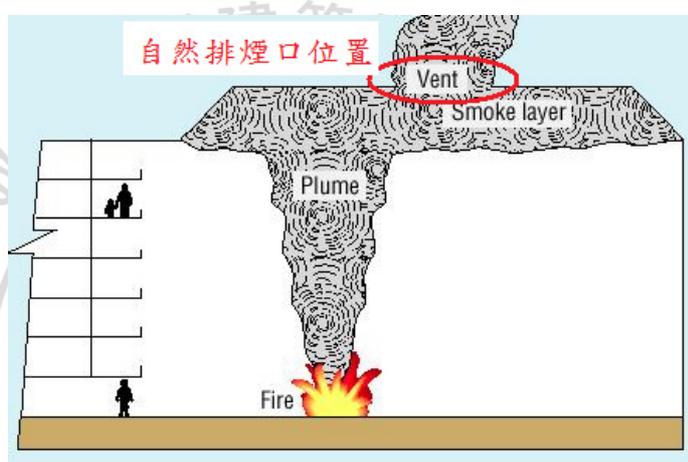


圖 3-1 大空間自然排煙煙控系統示意圖

自然排煙口之位置，最理想為位於挑空中庭頂部，或者蓄煙空間之高點。若萬一必須開口於建築物之側面，便須考慮外界自然風向。而自然排煙口的排煙量與排煙口大小、煙層深度、及煙的溫度有關。可藉由 3D CFD 電腦模擬而得，再經由全尺度實驗，印證其煙控性能。

2. 我國消防法規之相關規定

於各類場所消防安全設備設置標準中，第 188 條規定如下：

- ① 防煙區劃面積大小不得超過 500 m²
- ② 防煙壁下垂之深度須大於 50 cm(於地下室時為 80 cm)以上
- ③ 防煙區劃任意點離排煙口距離不得超過 30 m

④(自然排煙)排煙口總開口面積不得小於防煙區劃面積之 2/100

⑤機械排煙量不得小於該防煙區劃面積每平方公尺 1 立方米每分鐘(1 cmm/m²)

依據此規定，自然排煙口之開口面積須達樓地板總面積之 2 % 以上。然而，此 2 % 之自然排煙口應設置於何處，則並未有進一步規範。

舉例而言，高速鐵路左營站原依據我國消防法規設計之自然排煙口總開口面積即為 2%，並平均分布於屋頂之中部及頂部兩處地方，如下圖所示。然而，若萬一發生火災時，於大廳上升之熱煙將由於熱浮力之驅動而快速到達並蓄積於最頂部之蓄煙區空間。如此，位於中間部之自然排煙口將有如濃煙「過站不停」，而形同虛設。經設計修改後，自然排煙口之位置已極為適當。

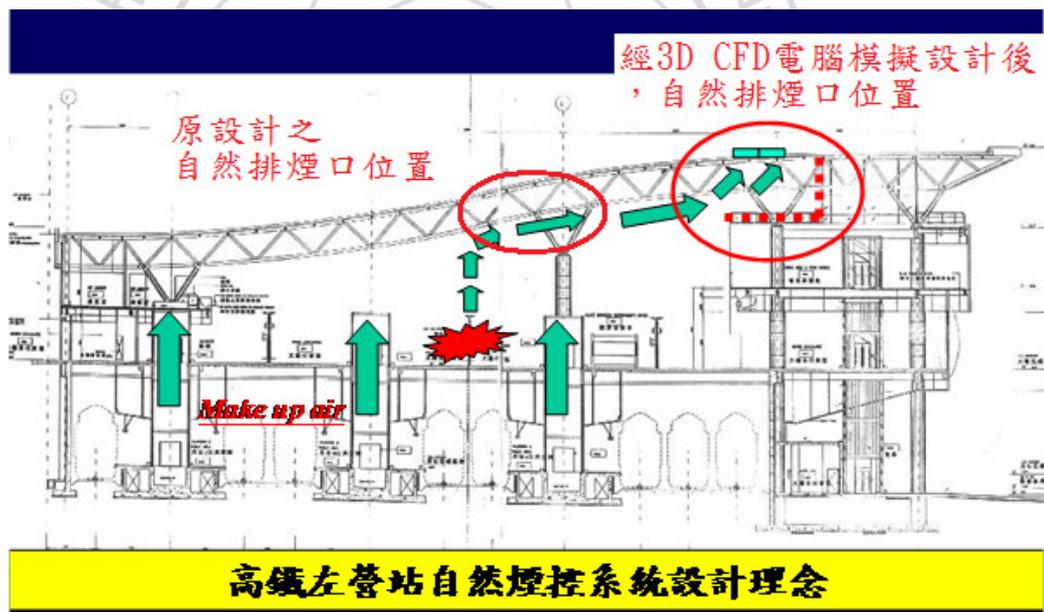


圖 3-2 高鐵左營站之自然煙控系統設計理念，充分利用大空間之蓄煙，並於頂部最高程部分設置自然排煙口，藉由底部之補氣形成推拉 (Push Pull) 之排煙形式。同時，原設計之自然排煙口總設置面積為樓地板總面積之 2%，經 3D CFD 電腦模擬結果而實際設計為 3.8%，大幅提升其安全性。

3. 自然排煙口之設計方式與案例分析

常見的頂部自然排煙口之設計有二種，包括：外推式、滑動式。最良好之自然排煙口設計為置於頂部，以高鐵左營站為最典型之應用案例。

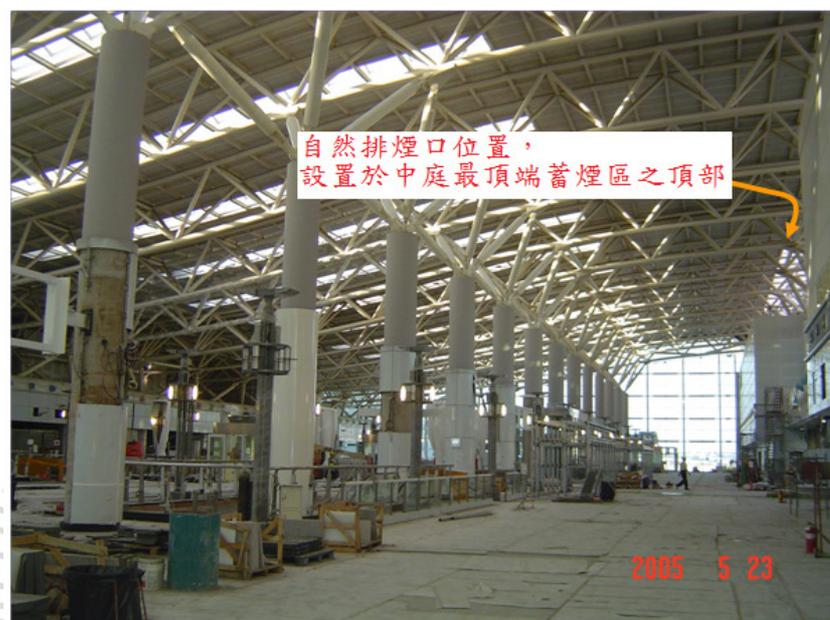


圖 3-3 高鐵左營站將自然排煙口設置於中庭最頂端蓄煙區之頂部，可消除外界風向之影響。

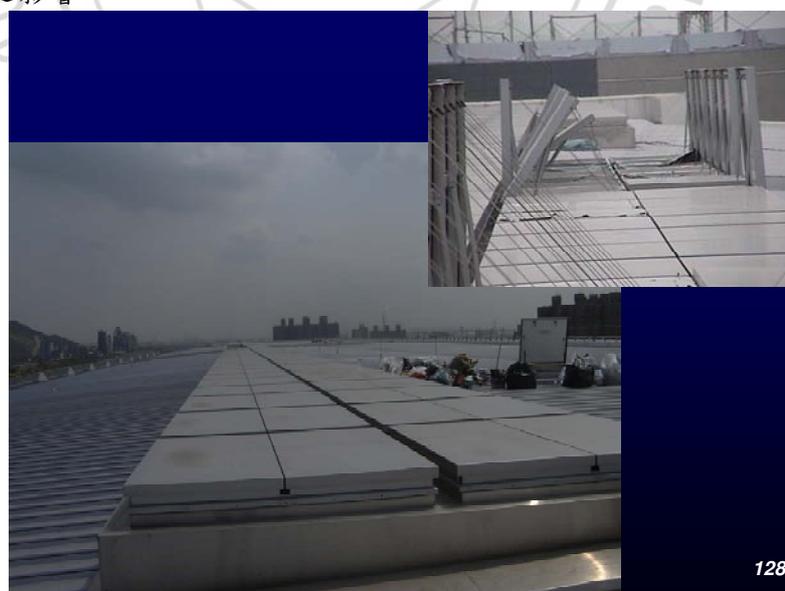


圖 3-4 高鐵左營站於頂部設置自然排煙口縱深三百米以上，為國際間少見之設計，經全尺度性能驗證，性能優良。

然而，由於台灣地區位居於亞熱帶，一年期間雨季甚長，因此，建築師對於直接於建築頂部開口設置排煙窗之方式，因害怕雨天漏水而有某種程度之心結，故如何於適當位置開啟自然排煙窗口而又不至於受強風及導致漏水之情況，往往考驗著建築師之智慧。

外推式之自然排煙口若位於蓄煙空間之側面，設計時須考慮自然風風向對排煙的影響。迎面風對於自然排煙之影響極大，較為妥善之設計方式為藉由設置風向風速計判斷，並開啟下風處之排煙口，但也因此使設計複雜化。”透天”之設計方式仍為最佳選擇。

以台鐵左營新站為例，其排煙口開啟時常需面對強大之落山風。因此，其他方位之自然排煙窗，尤其於下風處之排煙窗便相形重要。

滑動式自然排煙口常用於蓄煙空間之頂端，可將其挑空中庭屋頂設計為可動式。屋頂開啟方式可為拉開式或旋轉式，於發生火災時，藉由備用電力或人力使之開啟，進行排煙。

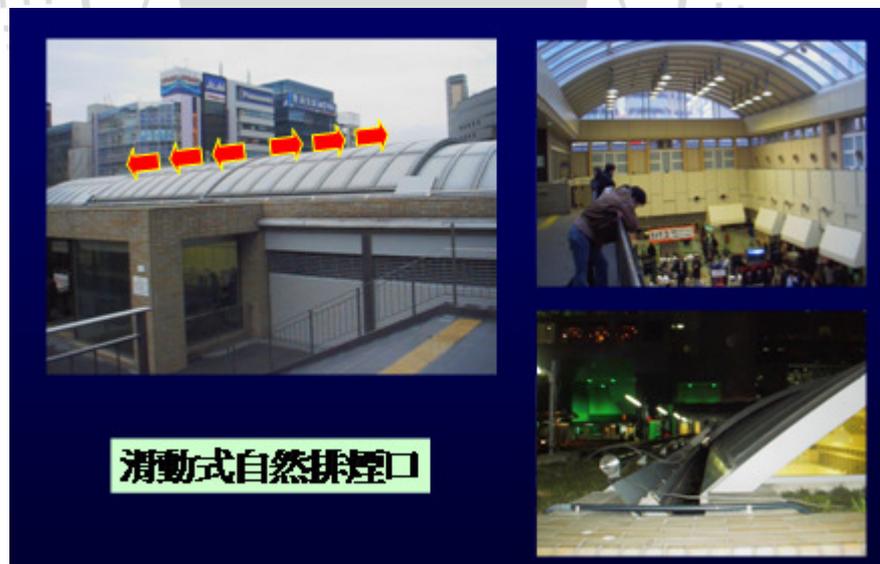


圖 3-5 日本 Sunshine City 內部購物中心設置之滑動式自然排煙口可於發生火災時於一分鐘內打開變成透天厝，瞬間消彌火災風險於無形。

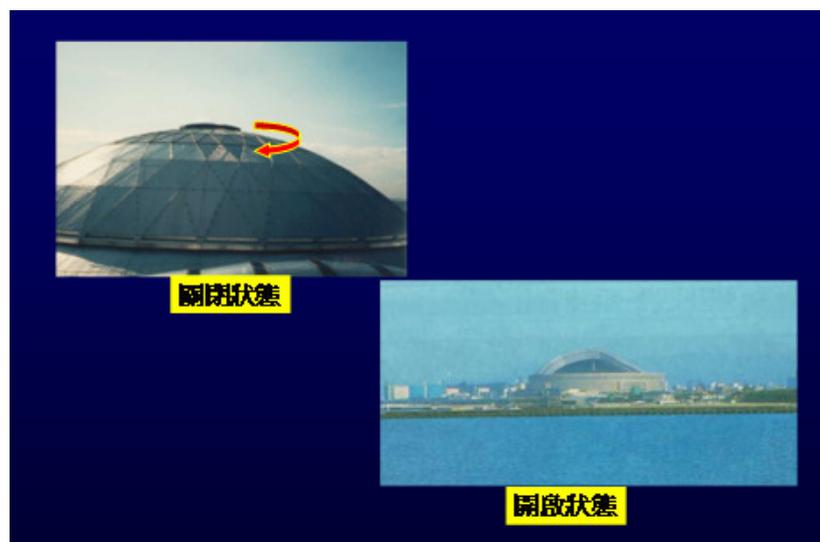


圖 3-6 日本福岡巨蛋為三萬五千人之表演場所，其頂蓋可旋轉打開。因此，於萬一發生火災時亦可急速消弭災害於無形。



圖 3-7 日本於 2000 年代初期大量興建此種滑動式頂蓋之大型購物中心或遊樂中心，其頂蓋接可兼具自然排煙效果。

3-1 小結

大空間自然排煙口設計可不用電力而運作，故萬一火災斷電時，仍可發揮煙控性能，具備 Fail-Safe 的優點。且自然排煙口設計程序簡單，煙控性能可靠。



第四章 大空間機械煙控系統設計應用分析

1. 設計理念分析

大空間機械排煙之主要目的為控制煙層至建築物內之安全高度，以減緩煙層下降速度進行煙控 (Smoke Management)，提供一條無煙之逃生避難路徑，保障人身安全，而非如一般傳統觀念，著眼於將煙完全排除(Smoke Removal)，於基本設計理念上不同。

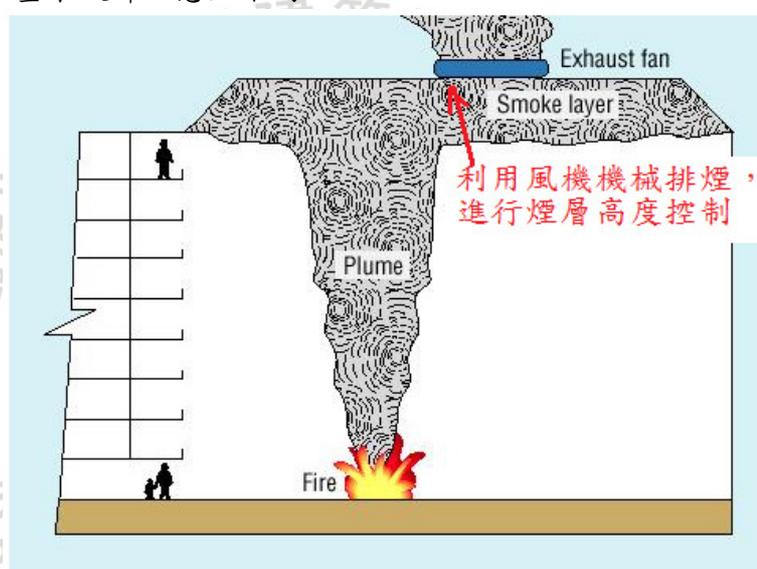


圖 4-1 大空間機械排煙煙控系統示意圖

於挑高中庭大空間頂部機械排煙之設計理念中，良好的應用蓄煙空間之設計與機械排煙風管系統之設計同等重要。良好之蓄煙設計，更可預防拉穿 (Plug-holing) 的現象產生。所謂拉穿現象，為當挑空中庭機械排煙風機運轉時，因蓄煙量不足 或風機啟動時機不當，使排煙機抽到大量空氣而造成紊流，不但降低排煙效率，更使煙氣下降速度加快向挑空中庭周圍區域蔓延，危害到人身安全。此現象類似水槽之水栓被拔開後，於水槽產生的漩渦一樣，故有此名。如圖 4-2 所示。理想的機械排煙乃將煙層有如雲海般拉高，因此保持分層很重要。

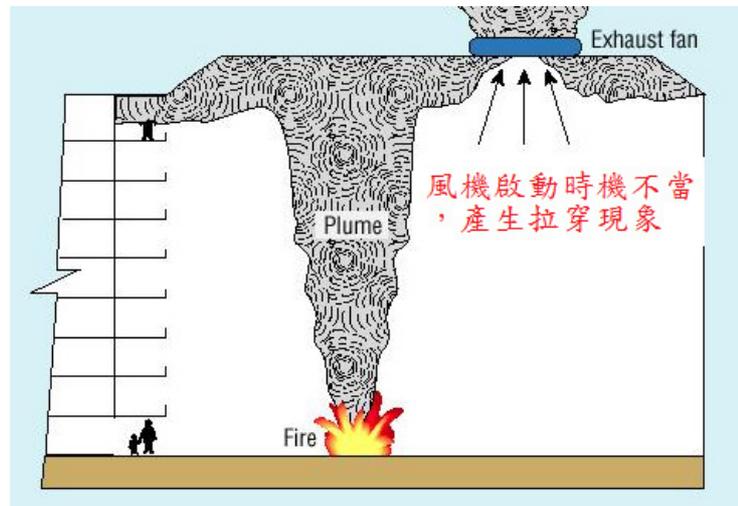


圖 4-2 大空間機械排煙運轉時，因風機啟動時機不當，產生拉穿現象。此時，溫度分層被破壞，導致氣流組織變成紊流，而快速下降。事實上，此時風機抽到的大部分是空氣，而非濃煙，排煙效率相當差。

拉穿現象之防止需要較高之性能式設計技術。一般設計師於發現煙層積速度過快之時，第一個直覺反應即為將排煙量加大。事實上，盲目的將排煙量加大只會導致拉穿現象之發生，所排放的也大部分是空氣而非濃煙，且攪亂煙層之溫度分層，有時導致煙層下降速度更快。改進之道為於加大排煙量之時同時增加排煙閘門之個數，以便將排煙口之風速降至合理之範圍內。此設計過程再經由 3D CFD 模擬進行反覆印證，直至得到良好設計性能為止。

另一方面，拉穿現象之防止亦可經由良好之風機啟動順序而達成。舉例而言，L 大樓具備 100 米高之挑高中庭。其風機之啟動並非一下子全部開啟，而是以 1-8-4-5-2-7-3-6 之順序為之。如此，不但其不斷電系統不至於一下子風機全部投入而跳機，且對於煙層溫度分層之保持極有貢獻。

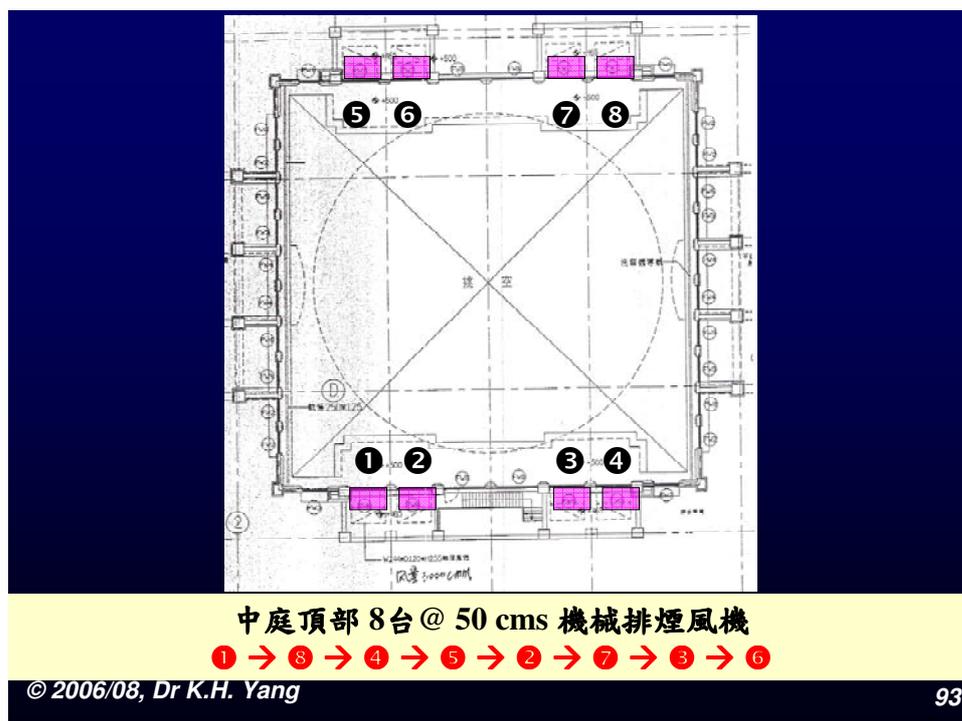


圖 4-3 某高層建築頂部機械排煙機佈置情形。同時為增加其排煙性能之可靠性減少拉穿現象發生之機會，風機之啟動順序已預先排定並經全尺度實驗印證完成。

2.我國消防法規之相關規定

我國現行法規「各類場所消防安全設備設置標準」中，第 188 條為有關排煙煙控系統之相關規定，內容主要包括：

- ①防煙區劃面積大小不得超過 500 m^2
- ②防煙壁下垂之深度須大於 50 cm (於地下室時為 80 cm)以上
- ③防煙區劃任意點離排煙口距離不得超過 30 m
- ④(自然排煙)排煙口總開口面積不得小於防煙區劃面積之 $2/100$
- ⑤機械排煙量不得小於該防煙區劃面積每平方公尺 $1 \text{ 立方公尺每分鐘}(1 \text{ cmm/m}^2)$

依此規定，每平方公尺之樓地板面積便相對應的設計有每 1 立方公尺每分鐘 之機械排煙量；同時，每 500 公尺 之範圍內便須設置防煙區劃，做為以適當深度之防煙垂壁環繞起來。此垂壁深度於地上建築規定為 50 公分 ，於地

下建築則為 80 公分。然而，所需設置排煙口之個數並無明文規定，因此導致許多個案於每一區劃僅設置一個排煙口設時，總排煙量雖可符合法規之要求，但事實上，排煙性能不一定良好。甚至，再盲目加大排煙設計量之時，產生拉穿效應，而使煙層快速下降。因此，如何配合良好之蓄煙空間與機械排煙為一重要之課題。

3. 案例分析

以桃園國際機場二期航站為例。出境大廳之挑高中庭形成良好之蓄煙空間。由於原設計之大空間並未設置任何排煙系統，經建議改善後，將原頂部 11 台排熱通風機加以升級使成為可耐 250⁰C 一小時以上之排煙兼用風機。

依此設計，當火災發生時，出境大廳之龐大蓄煙容量，首先減緩煙沉積下降速度；待偵煙探測系統啟動風機，並全部開啟估計逾 4 分鐘完成後，煙層已累積至桁架內 2.5 米深度，亦即維持約 20 米之淨高。隨著，火災之成長濃煙繼續上升而排煙系統已正常啟動，直到二者達到平衡，持續維持於 11 公尺之淨高。對人員之避難而言，2.1 米以上之淨高即已足夠，因此，充分驗證了此排煙系統之良好功能，可於萬一發生火災時，確保人員之避難安全。

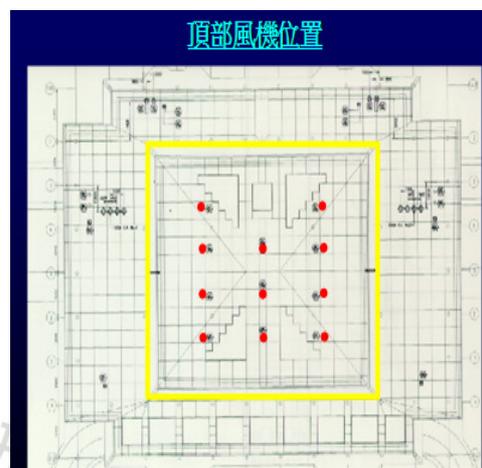


圖 4-4 桃園(中正)國際機場二期航廈出境大廳之挑高中庭形成良好之蓄煙空間，頂部並設置排熱與排煙兼用風機。

圖 4-5 桃園(中正)國際機場頂部風機佈設圖。此風機平時接受溫度感應器之訊號進行通風排熱，於萬一發生火災時，則轉變成全速運轉模式，為通風兼排煙之良好系統設計。



圖 4-6 桃園國際機場出境大廳頂部風機佈置實況

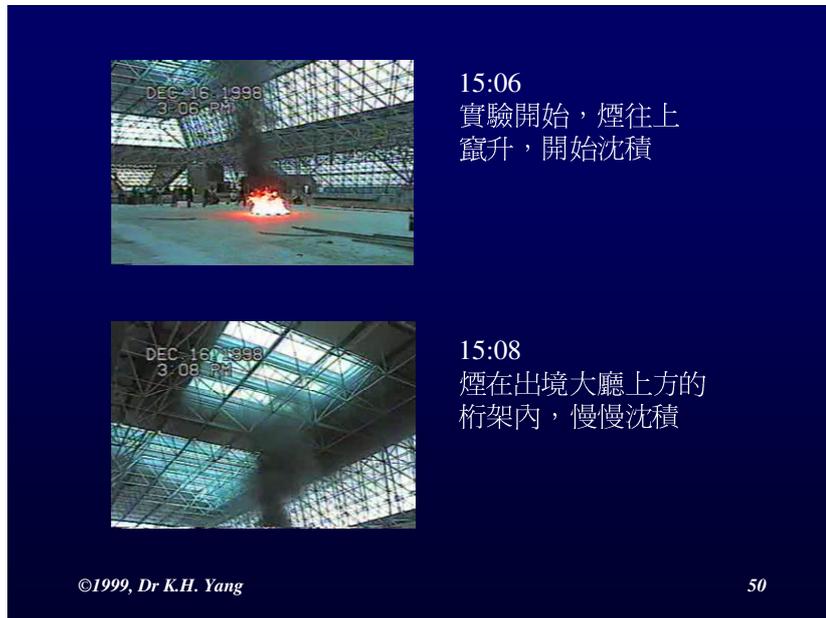


圖 4-7 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗之煙層積實況(一)

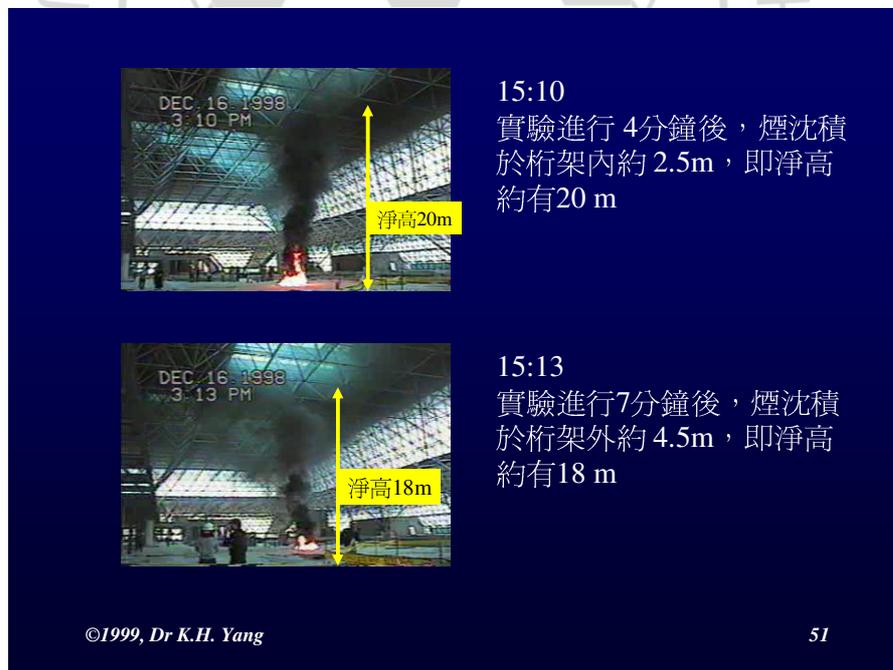


圖 4-8 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗之煙層積實況(二)

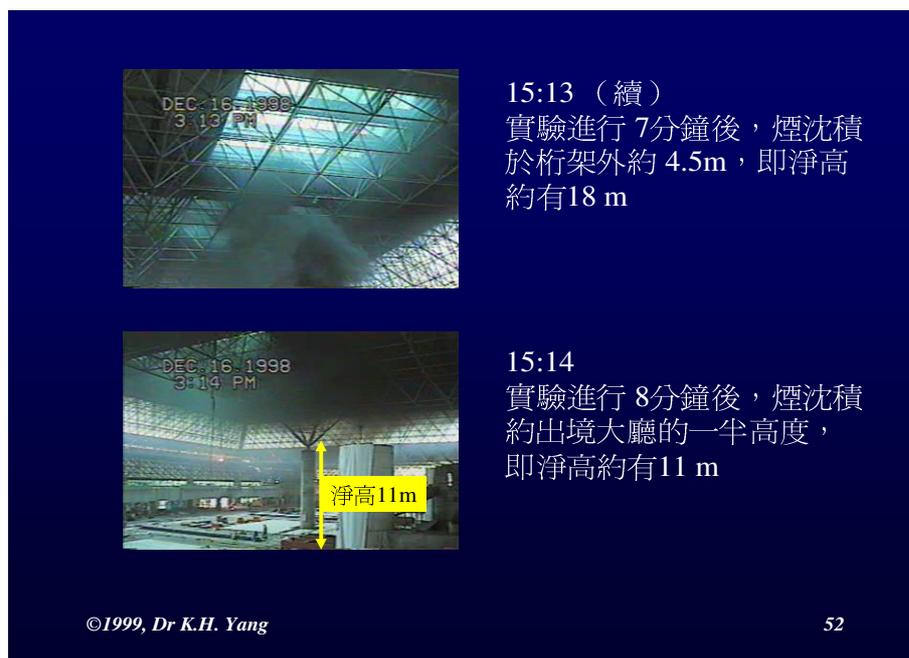


圖 4-9 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗之煙層積實況(三)



圖 4-10 桃園國際機場出境大廳於 1998 年進行火災熱煙全尺度實驗之煙層積實況(四)

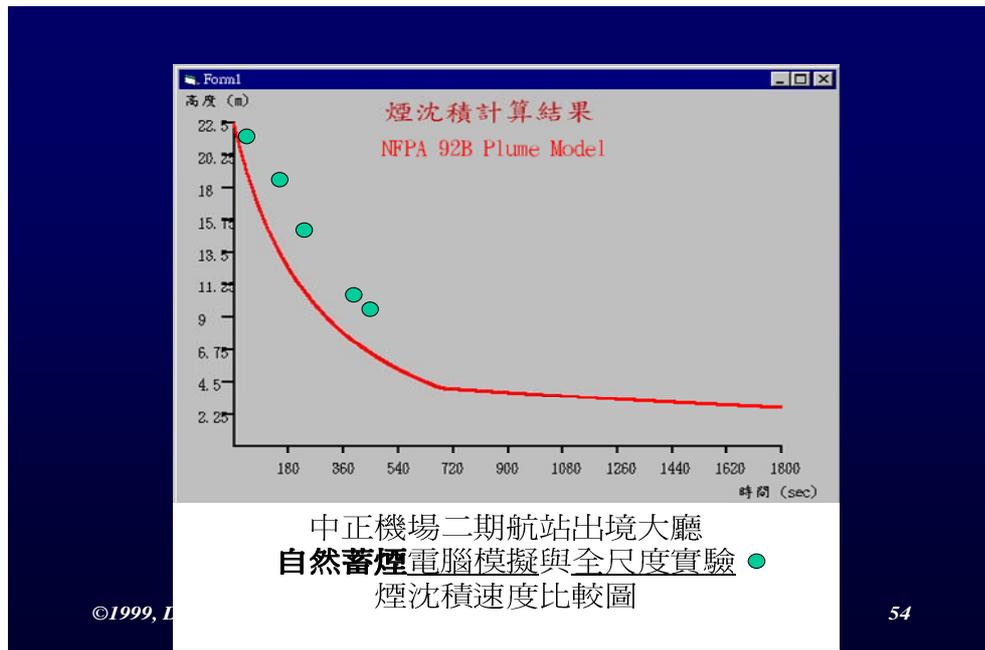


圖 4-11 桃園(中正)國際機場二期航廈於 1998 年進行全尺度熱煙實驗之數據比對分析，顯示具備良好之煙控特性。

今再另舉一大型購物中心之機械排煙應用案例加以說明。此購物中心位於台北市之鬧區，投資近百億元興建，完工時為整個東亞地區之最大型綜合購物中心。此購物中心共由一球型建築與旁邊之 L 型建築所組合而成，中間再以橫跨挑空空間之超長自動電扶梯加以連結，極具巧思。如下圖所示。

其中，由於地下二層美食街之火災風險最高，因此於其相對應之頂部空間，亦即俗稱之大峽谷處配備有容量相當大之機械排煙系統。設計之時，經 3D CFD 電腦模擬結果而選定 7.8 ACH 之排煙量。此甚至較 NFPA 101 所建議之 6 ACH 排煙量為高。亦顯示，性能式煙控系統設計並無所謂之固定排煙量建議值，而必須由電腦模擬與避難分析二者之間求取平衡點來達成。

經電腦模擬結果顯示，於中庭發生 5 MW 之火災時，本系統可將煙層控制於 10F~12F 間之蓄煙空間，而使人員得以安全避難。有趣的是，在該購物中心完工啟用後半年之時間曾遭人以攜帶汽油之方式縱火，結果所有煙控避難系統皆完全依照所設計之程序自動進行，而沒有發生任何人員之傷亡。此相當於上

帝親自做的實驗，更充分印證了以 3D CFD 作為性能式煙控系統設計之重要性與有效性！

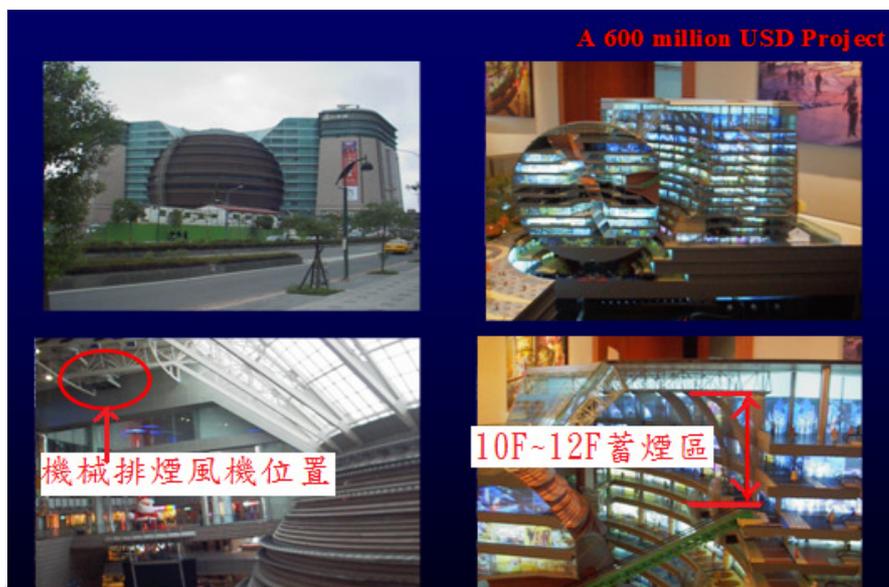


圖 4-12 台北某大型購物中心中庭頂部之蓄煙區與機械排煙系統設置示意圖

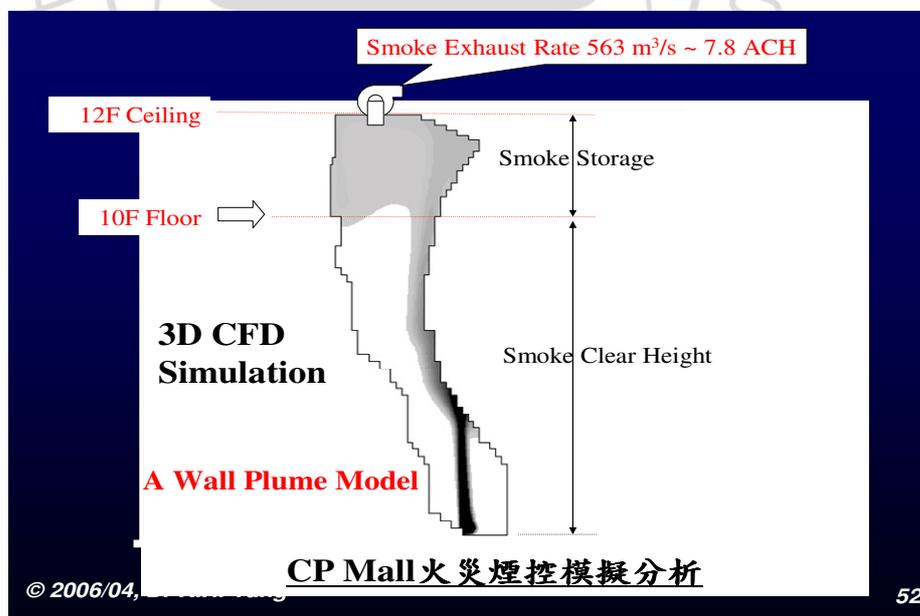


圖 4-13 台北某大型購物中心中庭進行 3D CFD 火災煙控電腦模擬分析結果

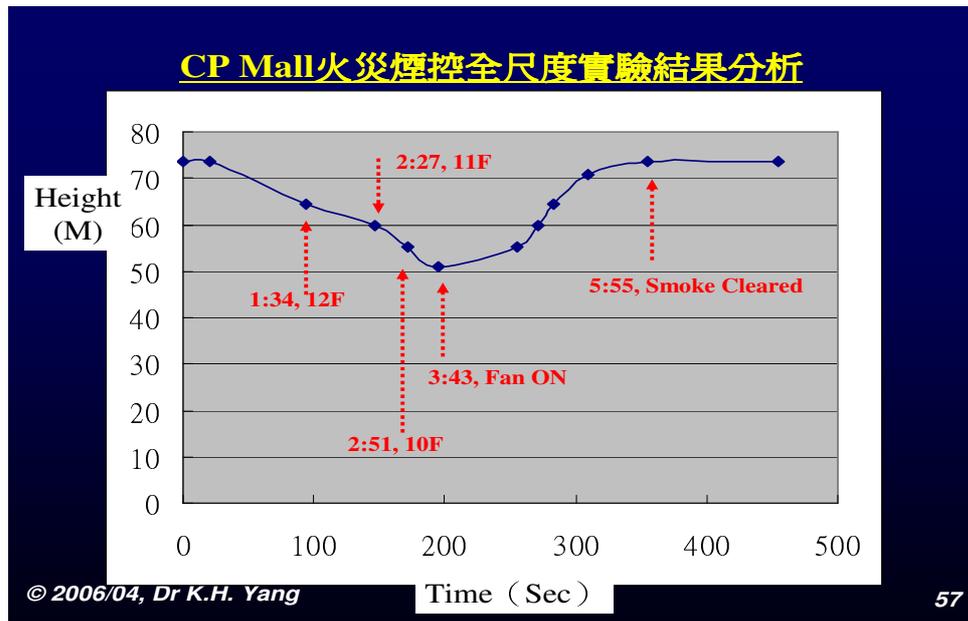


圖 4-14 台北某大型購物中心中庭進行全尺度火災煙控實驗結果分析，顯示優良之煙控性能，煙層淨高可維持於離地 50 公尺以上。

再舉 1 例加以說明。本案例為一座 15,000 人容量之綜合室內體育館，亦即通稱之巨蛋球場。此球場之基本設計乃由國際間最聞名之 hok 與國內建築師配合進行，為我國首度進行之大型巨蛋球場建設案，極具劃時代之意義。

本體育館共應用了自然蓄煙(1)，自然排煙(2)，機械排煙(3)，自然補氣(4)，樓梯間加壓(5)等先進技術，建構完成一個良好的大空間煙控系統設計，如下圖所示。其補氣系統設計，不但提供煙控之推拉(Push Pull)助力，且其氣流方向正好與避難方向相反，對於人員之逃生避難提供了良好之保護，頗具巧思。

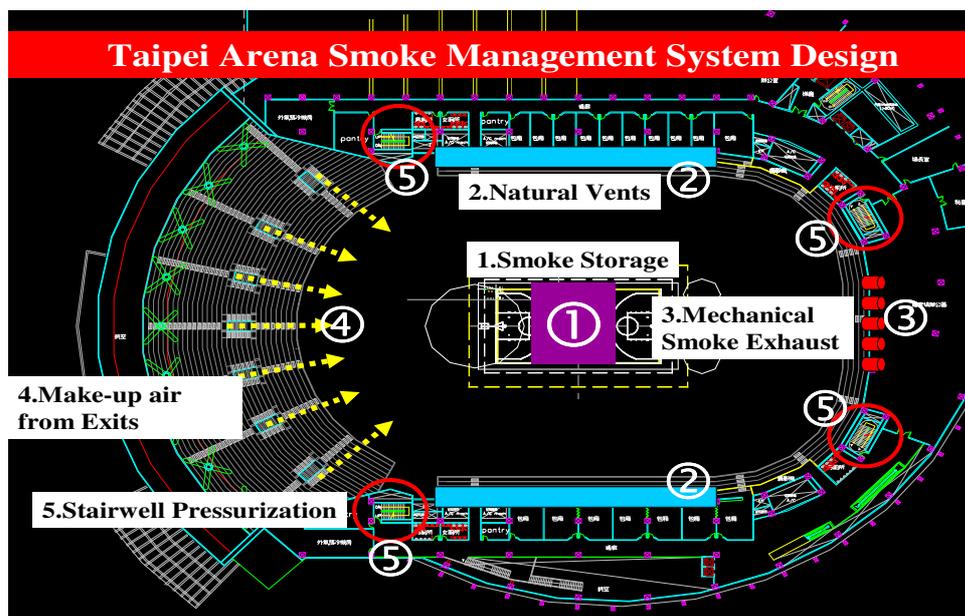


圖 4-15 台北小巨蛋應用自然蓄煙(1)，自然排煙(2)，機械排煙(3)，自然補氣(4)，樓梯間加壓(5)等先進技術，建構完成一個良好的大空間煙控系統設計

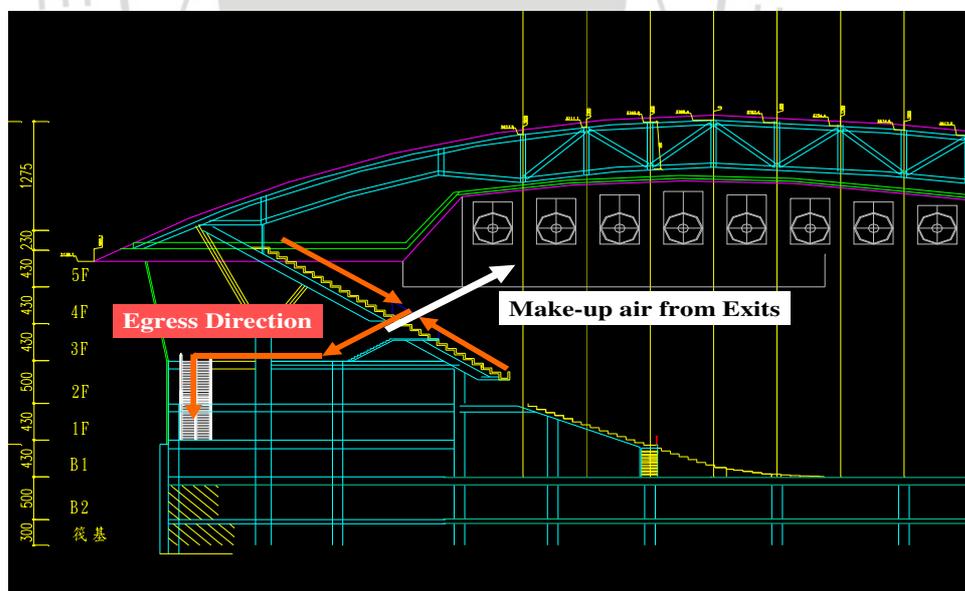


圖 4-16 台北小巨蛋之補氣不但提供煙控之推拉(Push Pull)助力，且其氣流方向正好與避難方向相反，對於人員之逃生避難提供了良好之保護。



第五章 挑空中庭及大型開闊空間之周圍區域區劃排煙系統設計應用分析

1. 區劃排煙

1-1 基本設計理念分析

原則上這些圍繞著挑高中庭之區域，本身之建築型態頗類似於一般居室。因此，其內之排煙系統可依據一般之區劃排煙方式進行。

當居室發生火災時，居室本身的區劃排煙系統形成第一道防線，不讓煙流入居室外之走廊，如圖 5-1 所示。而於煙流出居室，再由走廊的機械排煙系統排掉，形成第二道防線不讓煙流入中庭，如圖 5-2 所示。此種設計較接近條例式法規之想法。

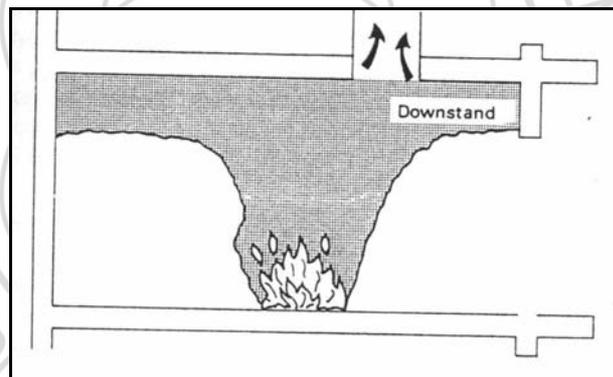


圖 5-1 由居室本身的排煙系統排煙，不讓煙流入居室外之走廊，形成第一道防線

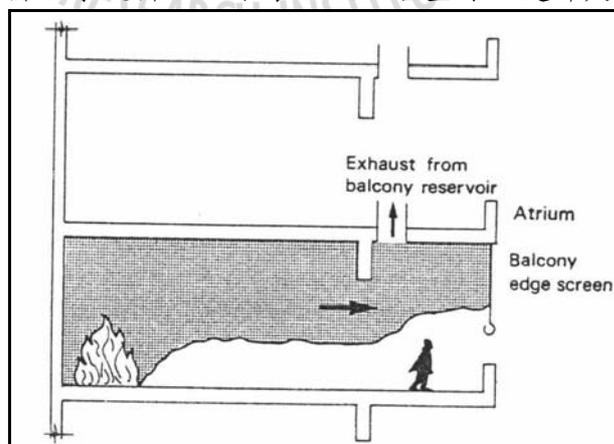


圖 5-2 一旦煙流出居室，再由走廊的機械排煙系統排掉，形成第二道防線

典型之平面式機械排煙系統設計平面圖，如圖 5-3 所示。因為需要設計排煙風管至樓層的每個角落，故所需風管總長度相當長。且於目前建築空間普遍缺乏的情況下，設計佈置如此長且密的排煙風管，亦為很難解決之問題。

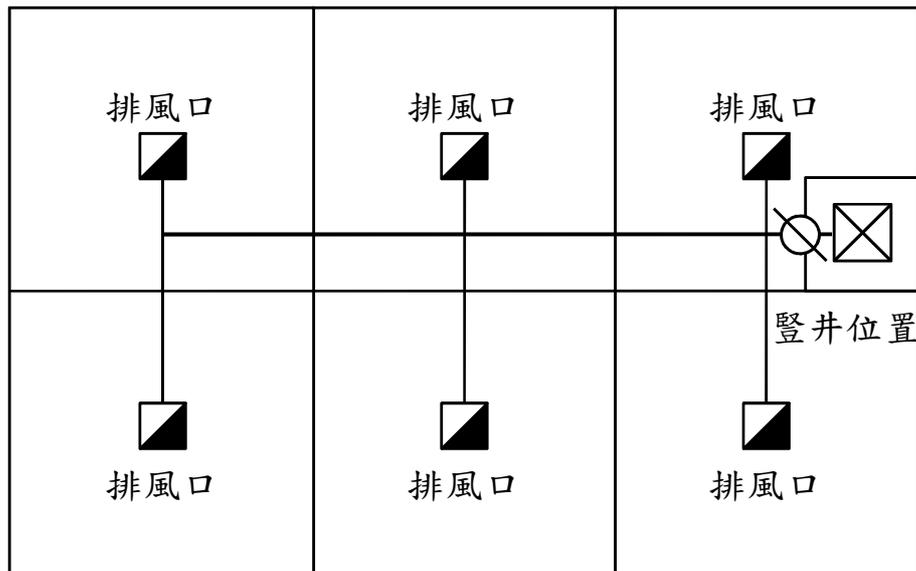


圖 5-3 典型平面式機械排煙系統設計平面圖

由於每個樓層需要各自的排煙機，所以有多少樓層就有多少台排煙風機。再根據我國現行消防法規【各類場所消防安全設備設置標準】中，第 189 條第八款規定：「排煙機應連接緊急電源。」。故每個樓層的排煙機，必須各自連接各自之緊急電源，則所需緊急電源數目變多，投資成本相當可觀。

另外，於每層樓設置排煙風機，亦即風機有可能暴露於火場之中，如圖 2-33 所示。故其裝有排煙風機的機械室，需具備防火等級設施。無疑地，又增加其初設設備投資成本。

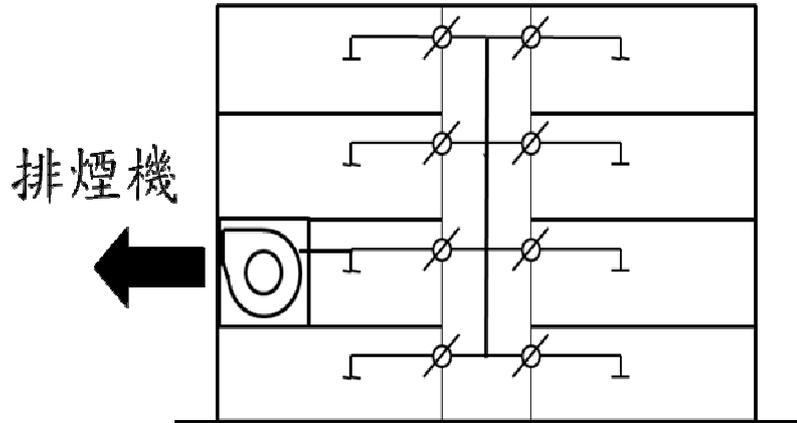


圖 5-4 平面式機械排煙系統風機之佈設,有可能暴露於火場之中,減低了系統之可靠性

反之,豎井式機械排煙系統設計則無以上平面式機械排煙系統之缺點,其典型設計圖,如圖 9-34 所示。在圖中顯示,由於於建築內設置排煙豎井,故不用將排煙風管拉至建築物每個角落,進而節省排煙風管成本。故對於如挑空中庭周圍區域之大面積的建築特性而言,使用豎井式排煙系統設計可大量節省排煙風管設計長度。

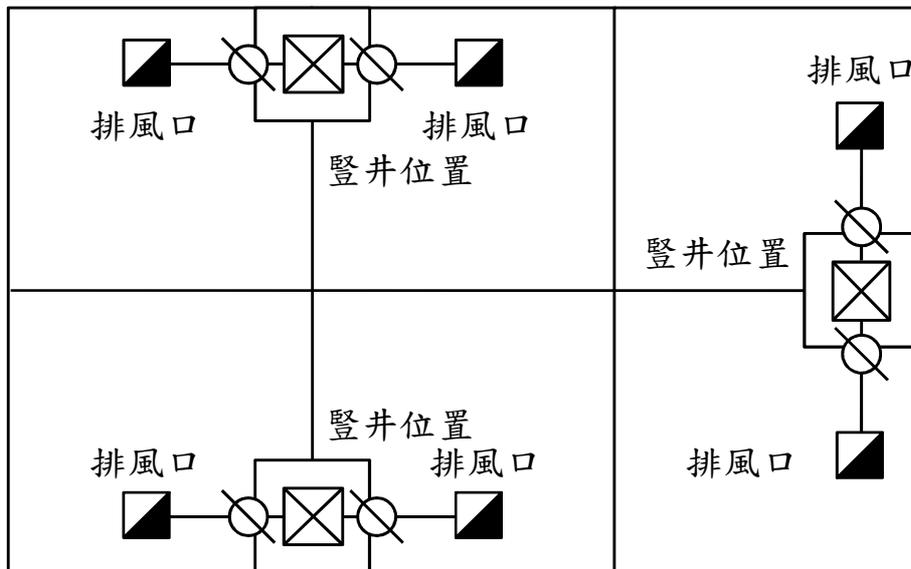


圖 5-5 典型豎井式機械排煙系統設計平面圖

另外也可節省管道空間，免除閃躲各種管線的煩瑣設計。此外，風機個數也大量減少，一般每個排煙豎井一個排煙風機即已足夠，不須每個區劃或每層樓一個排煙風機。風機個數減少，相對地代表緊急電源容量亦減少，節省設備初設成本。由於排煙風機只設置於排煙豎井上，故風機位置為位於建築物的最頂端，如圖 2-35 所示。如此可避免使排煙風機暴露於火場之中，不僅可免除排煙風機被燒燬的危險，更可節省機械室設置防火等級設施的設備投資成本。

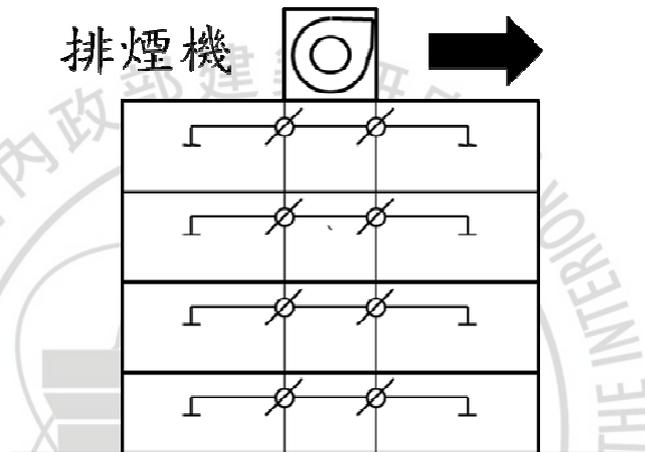


圖 5-6 豎井式機械排煙系統設計示意圖，其風機位於建築物的最頂端

因此基於以上平面式與豎井式機械排煙系統兩者之優缺點比較，並考慮挑空中庭周圍區域之大面積的建築特性，於設計機械排煙系統時，一般皆會採用豎井式機械排煙系統設計。但此種設計方式常須規劃複雜的風管閘門切換，形成一個操作模式表，而置於防災中心之監控電腦中。設計較為複雜，必須謹慎為之。

1-2 案例分析

今以台北某捷運車站為例，加以說明。原設計於月台層只單純的以機械排煙風管貫穿，並無設置任何防煙垂壁。而且，當偵煙探測器啟動時，將把所有排煙閘門同步開啟。此時，位居排煙機最近之排煙口將因壓力降最小而有最大之排煙量。反之，距離最遠之排煙口，則因壓力降最大，而有最低之排煙量。

據實測結果，此最大與最小之排煙量，竟相差達3倍。也因此當月台發生火災時，大量之濃煙於月台水平擴散，並集中至排煙量最大的排煙口，而致整個月台煙霧瀰漫，形成避難上之困難。

經修改原設計後，依區劃排煙之理念，以防煙垂壁進行區劃。同時，將偵煙探測器改為可位址式(addressable)。因此，當某區發生火災時，唯有該區之排煙口會開啟，而形成單區排放；而於煙霧瀰漫至鄰區之時，再啟動第二區。排煙區之容量設計，也依此二區排放之設計。同時加設專用之排煙風管。經此修改後，本車站之機械排煙性能大大提升，經全尺度實驗印證，效果良好。

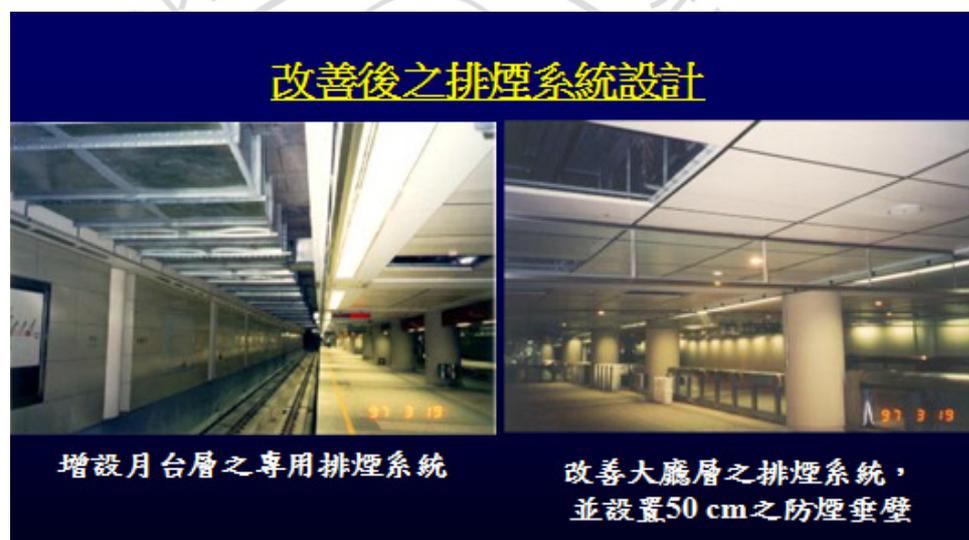


圖 5-7 某捷運車站將月台層設計區劃排煙並設置專用排煙管之實況



圖 5-8 某捷運車站將穿堂層設計區劃排煙並進行兩區同時排放全尺度實驗之實況，實驗結果性能良好。於萬一發生火災後，6 分鐘內人員之避難動線一直維持良好之能見度。

2. 利用天花層蓄煙之機械煙控系統設計

2-1 基本設計理念分析

挑空中庭周圍區域如商店等一般屬居室性質，若利用於天花板上與結構樑架間之空間作為自然蓄煙之用，結合佈設其內之機械排煙系統，則可形成先進之天花內部蓄煙煙控(Chambering Smoke Control System)策略，如圖 2-36 所示。

其設計理念為將機械排煙系統之風管設置於天花板上與結構樑架之間；亦即將風管深入自然蓄煙空間內。當挑空中庭周圍區域發生火災時，居室所產生的煙，可以經由天花板面之開口，或燈座周圍開口，而進入天花板上蓄煙區。等到蓄煙區的煙層形成後，再啟動於蓄煙空間內之機械排煙系統。此舉有如將吸管插入杯中吸取飲料一般，可大大增強排煙效率。此更可視為大空間煙控結合蓄煙與機械排煙之縮小版。

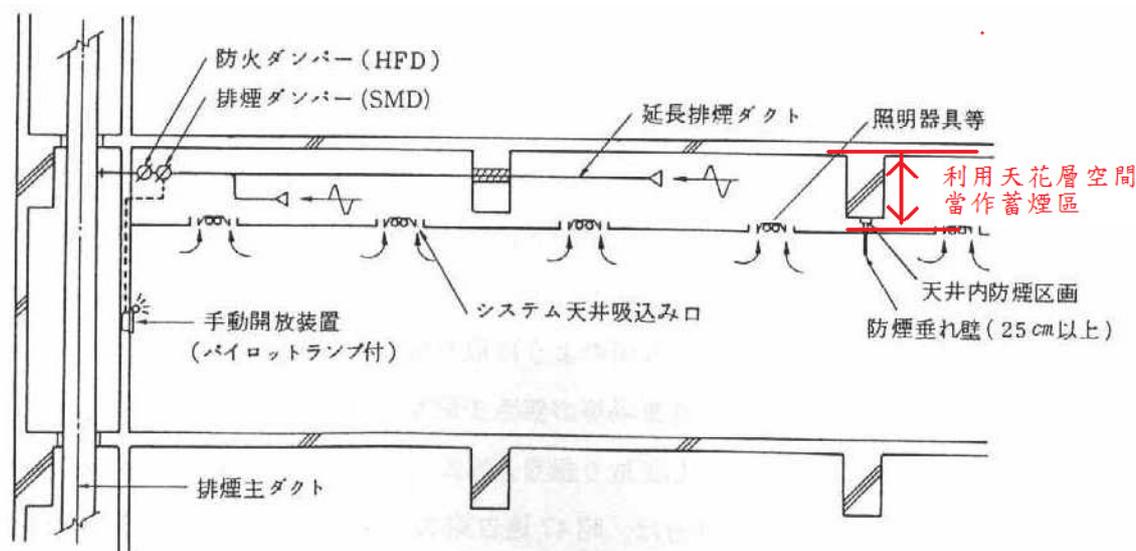


圖 5-9 利用天花層蓄煙之機械煙控系統設計(Chambering Smoke Control System)示意圖

2-1 案例分析

今以某新建鐵路車站為例，加以說明。如下圖所示，於左邊係一般設計之月台層上方密實天花；右邊則為具穿孔之流明天花。當進行密實天花系統之煙控系統設計時，必須以大量之防煙垂壁進行良好之區劃排煙之規劃，有如上節所述。反之，若改以流明天花來進行，則其天花上方之巨大蓄煙空間將可良好的延緩煙層下降速度，不但對於人員避難所需要之黃金時間提供了最佳保障，且若經由良好之設計，可部分減少所需之機械排煙量，形成良好之性能式設計。此方面有待進一步探討及開發新技術，而於日本等先進國家則已相當普遍。

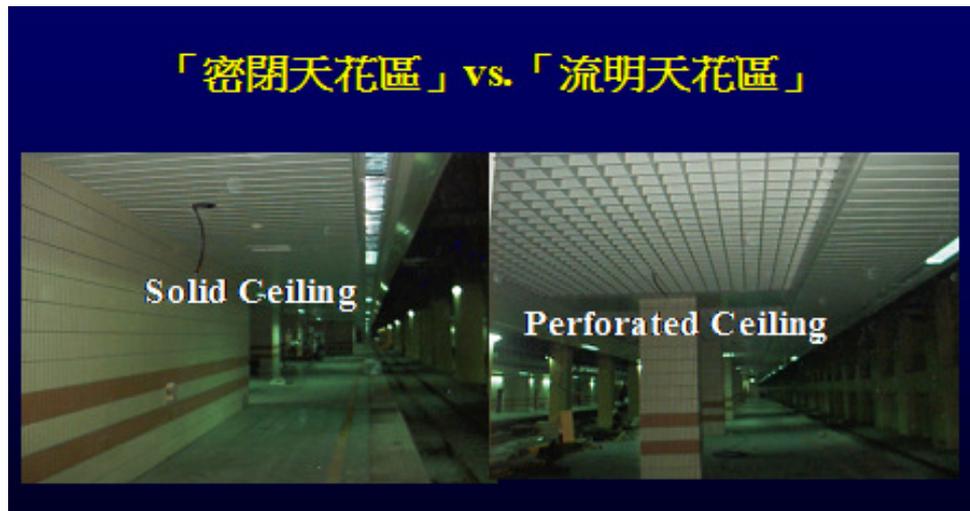


圖 5-10 某地下車站採用密閉天花與流明天花進行區劃排煙全尺度實驗發現，流明天花之方式由於具備良好之蓄煙效果，因此煙控性能較為優良。

再舉一例說明之。本車站於天花板上方具備深達 5.3 公尺之蓄煙空間，經規劃機械排煙後，進行全尺度實驗發現萬一發生火災後，人員有高達 10 分鐘以上之避難時間，且維持極良好之能見度。遠高於 NFPA 130 所規範之 6 分鐘避難時間之需求，成效良好。



圖 5-11 某車站於流明天花內部設置機械排煙風管，並充分利用蓄煙區之良好設計

再舉一三鐵共構之轉乘大廳為例加以說明。為充分利用此天花板上方之 3.7 米深巨大蓄煙空間，本系統設置機械排煙系統加以整合。經以 5 MW 之全尺度火災實驗結果顯示，經以 6 ACH 之排煙量進行，可維持 4.5 米以上之淨高，亦即煙根本完全被侷限於天花板上方之蓄煙空間。而當進一步刻意將排煙量降低至 5 ACH 時，煙層淨高仍能維持 4 米以上，對於避難安全仍可完全確保。直到將排煙量降低至 4ACH 時，煙層才降至離地 2 米高度，可視為排煙性能之下限所在。本次實驗，亦充分驗證了 NFPA 101 之權威性。

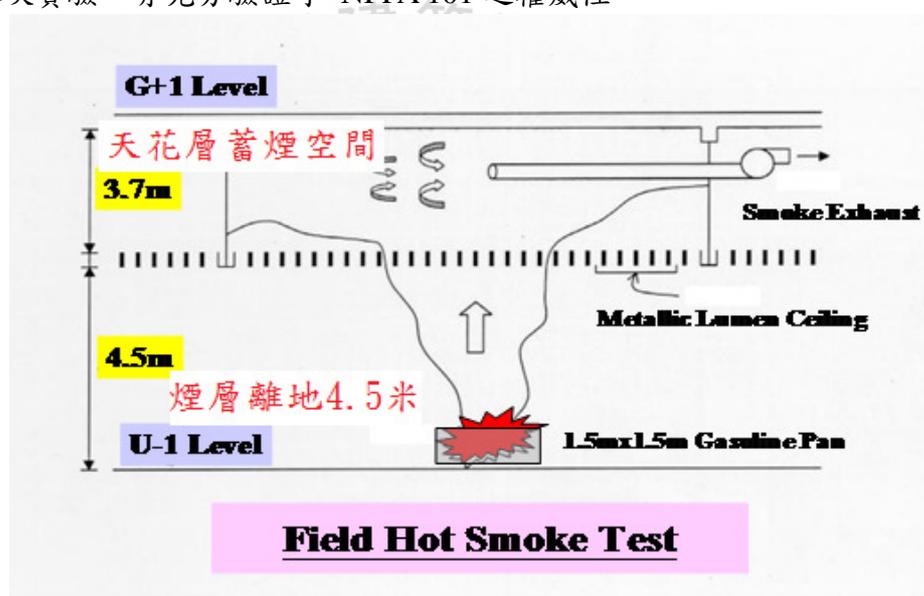


圖 5-12 某大型車站於流明天花內部設置機械排煙風管，並充分利用蓄煙區之良好設計示意圖。經進行區劃排煙全尺度實驗，獲得良好之成果

此種天花板上方之蓄煙煙控，其設計重點為火災時產生的煙能否透過天花板面之開口或間隙，而進入天花板上方之蓄煙區。亦即其煙之穿透率，為重要之考量因素。

3. 利用渠道導煙之機械煙控系統設計

3-1 基本設計理念分析

大空間周圍居室區域煙控系統之另一理念為形成通導煙之渠道 (Channeling)。於本身居室區域優先進行區劃排煙 (Zoned Smoke

Control)，萬一無法完全處理所產生的煙，則再通導煙流入大空間內，由大空間煙控系統進一步處理。此又稱居室與島嶼 (Cabin and Island) 之概念，香港之赤臘角機場為典型案例。

國外先進國家如歐、美、日本、澳洲等，近年來大量興建具中庭之大空間建築，皆以大空間蓄煙兼頂部機械或自然排煙之方式，再配合人群之避難規劃與分析，而獲得高性能與低造價之設計方式。

設計方法概述

將大空間建築物內，如購物中心、機場等，分成兩種建築型態，分別進行其火災煙控系統設計。亦即分為：

1. 居室 (如商店部份)
2. 島嶼 (挑空中庭區)

居室區定義

所謂居室區為大空間建築物內火載量較高的部分，如商店區。該區發生火災時，其產生的火與煙，由各自之火災煙控系統自行處理。不使火與煙蔓延至其他非火災區。為典型之區劃排煙理念。

此可依照我國現行法規「各類場所消防安全設備設置標準」中，第 188 條之相關規定設計。即每間商店各自以防火鐵捲門與防火牆形成單獨之防火區劃，並於其內設置每間商店專用之煙控系統 (機械排煙)，及包含火警探測器、自動警報系統、自動撒水系統等。

島嶼區定義

所謂島嶼區為大空間建築物內火載量較小的部分，如休息區、走廊、服務櫃台等。

該區發生火災時，其產生的火，不會延燒到其他非火災區。其產生的煙，可上升至大空間頂部，再進行處理。

島嶼區煙控設計

當挑空中庭區發生火災時，或商店部份發生火災，但商店本身之煙控系統無法處理而煙流入挑空區時，可利用其頂部大空間蓄煙煙控能力，輔以機械或自然排煙，控制煙層下降速度，此時人員於煙層高度以下進行疏散與避難逃生。

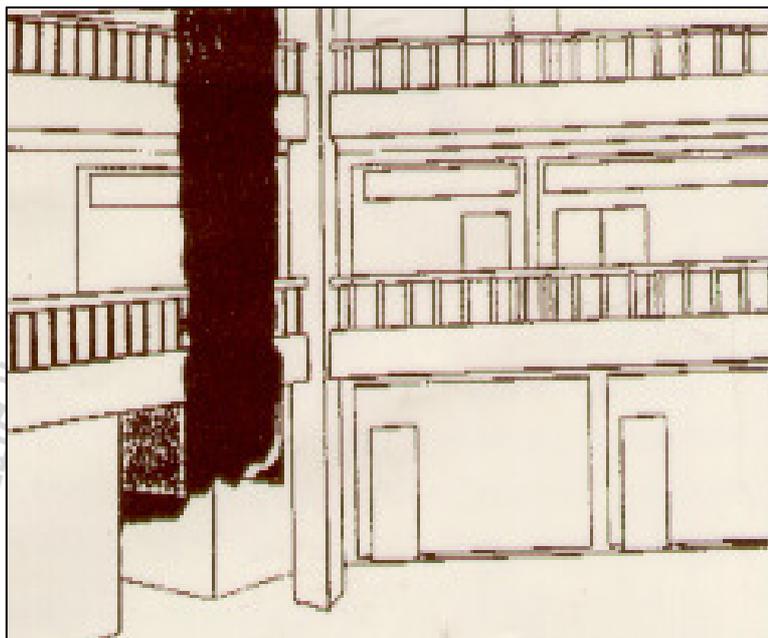


圖 5-13 煙導引渠道(Channelling Screen) 示意圖

島嶼區防火設計

當休息區、走廊、服務櫃台等發生火災時，必須考慮其每個個體之輻射熱不會引燃其他個體。且其每個個體之火焰高度，並不會延燒到其他個體。

3-2 案例說明

今以香港某機場為例，加以說明。

於其四樓出境大廳先大體區分為居室區，與島嶼區(斜線陰影區)兩類。依上述設計原則，居室區為大量之免稅商店，其內部設置有獨立之排煙與灑水系統。而島嶼區則為旅客等待登機之座位。其考量為旅客所攜帶之行李萬一著火或人為縱火，則其產生之濃煙皆由出境大廳之廣大蓄煙空間來加以處理。而各排座位間之間距，則考慮萬一其中一排燃燒其輻射溫度不至於引燃下一排座位為度。此種良好之分區處理(Zoning)原則，值得學習。

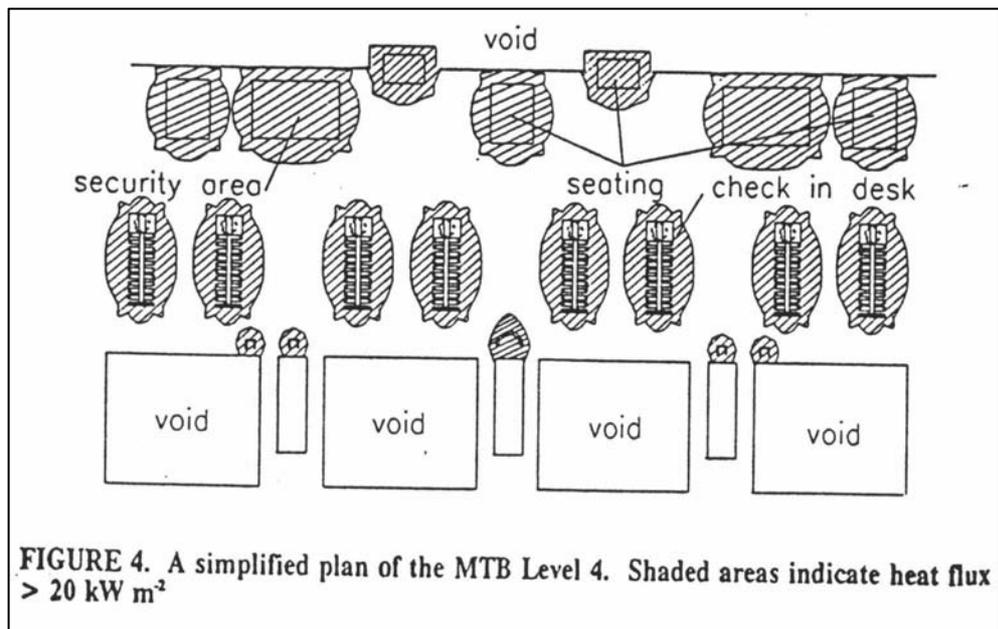


圖 5-14 四樓出境大廳模擬結果顯示，有陰影區之部分皆為熱輻射強度大於 20 kW/m^2 ，必須注意處理。

4.小結

大空間建築性能式煙控系統之設計理念，乃配合建築外型及尺寸特性善用蓄煙區之規劃，配合自然排煙及機械排煙之方式，將火災發生之濃煙控制於某個高層，以確保人員避難時之安全。在眾多設計手法中，無疑的 3D CFD 電腦模擬遂形成最重要的模擬工具，屬於後續將另闢章節詳述。

本章所舉之設計實例，亦勾勒出我國近十年來性能式煙控系統設計發展之經緯。放眼未來，此工程技術將進一步大放異彩。

第六章 火災偵煙探測器之應用設計分析

火災探測器之偵知為啟動排煙設備之主要設備之一，排煙系統之啟動時間，視火災探測器偵知時間之快慢而定，其重要性不言可喻。

1. 各類型火災探測器工作原理簡介

火災發生時所產生之熱、煙以及火焰等可被偵測出來而自動感知到火災發生，並能將此信號轉換成火災信號並向受信機通報之儀器即稱為探測器。

火災之探測器主要分成熱探測器、煙探測器（其中並有結合熱煙複合式之探測器）、以及火焰探測器三大類，其中視各種不同用途、運作原理、及偵測範圍設置之探測器，並安裝於探測器最容易捕捉到火災狀態之處，同時能適應火警分區規劃或探測區域內存在之可燃物狀態。圖 9-1 中，為列出目前所有探測器種類型之整理。

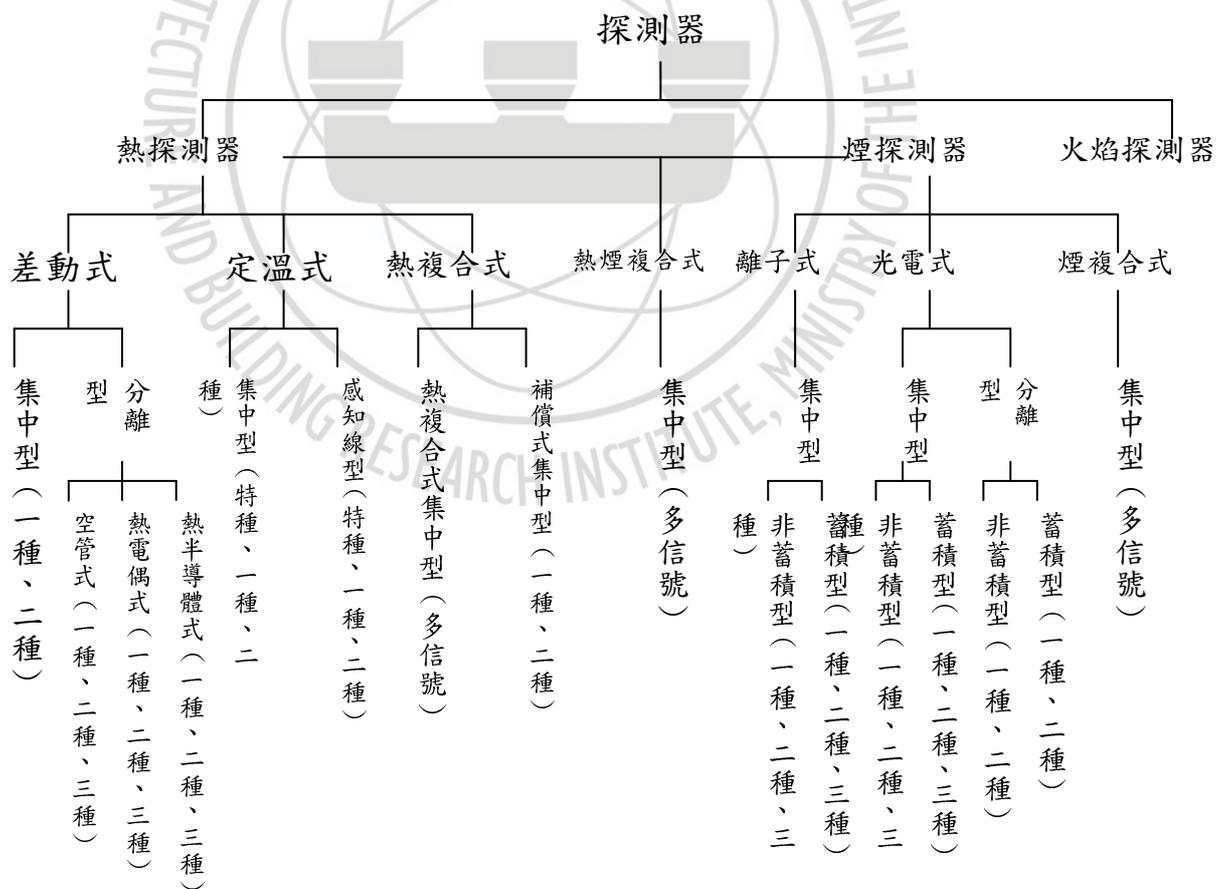


圖 6-1 各類型探測器種類型之分類。

對於圖 6-1 所列之眾多探測器種類中，特種、一種、二種、與三種（以下簡稱為(特)、(1)、(2)、(3)）之規格定義為：凡溫度範圍越大、靈敏度越高者，其編號越小。例如，一種探測器所偵測之範圍與靈敏度，將比三種探測器來得大，且分離型亦比集中型之偵測範圍更廣。

基於各種探測器有其個別之用途、原理、及偵測範圍，因此若無一法規訂定其安裝與適用範圍，勢必將有許多問題產生。因此，根據「各類場所消防安全設備設置標準」中法規第 114 條所規定探測器應依裝置場所高度之內容，整理成下表 6-1。

表 6-1 各裝置場所高度所設置之探測器類型

裝置場所高度	探測器種類
未滿 4 公尺	差動式集中與分離型全部 熱複合式補償式集中型 定溫式與離子式集中型全部 光電式集中與分離型全部 火焰式
4 公尺以上未滿 8 公尺	差動式集中與分離型全部 熱複合式補償式集中型 定溫式(特)(1)、離子式集中型(1)(2) 光電式集中型(1)(2) 光電式分離型全部 火焰式
8 公尺以上未滿 15 公尺	差動式分離型全部 離子式集中型(1)(2) 光電式集中型(1)(2) 光電式分離型全部 火焰式
15 公尺以上未滿 20 公尺	離子式集中型(1) 光電式集中型(1) 光電式分離型(1) 火焰式

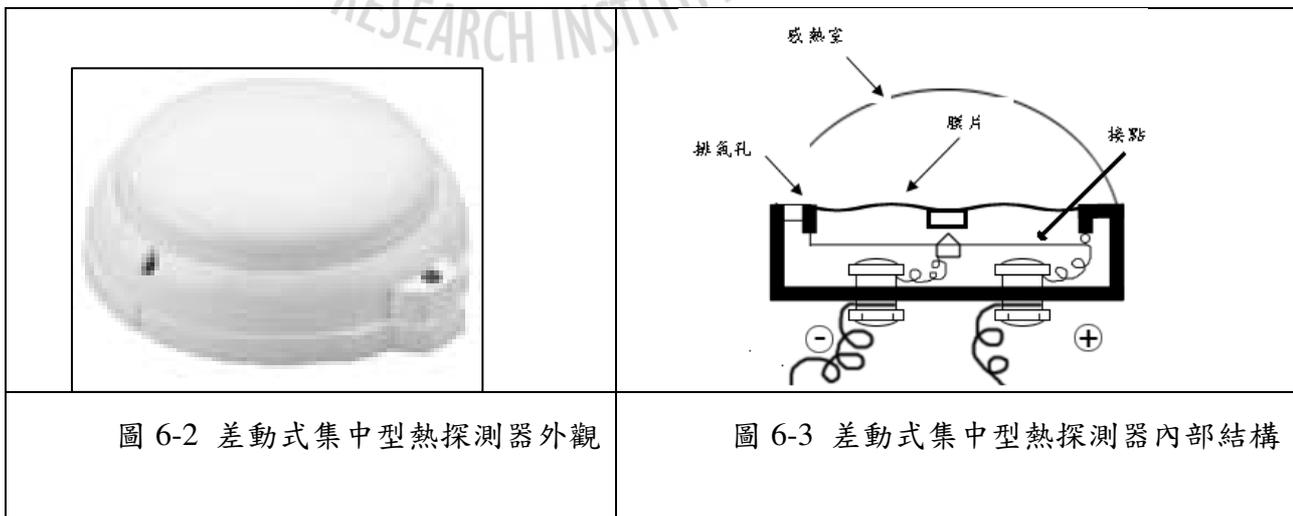
2.我國消防法規之相關規定

目前我國現行消防法規中，有關火災自動探測部分，見於「各類場所消防安全設備設置標準」第二章第一節之「火警自動警報設備」。文中詳細列出裝設各種火警自動警報設備之規定，例如探測器裝置之場所、位置、與高度等等。其所列條文為適用一般居室裝設探測器之用，於具備室內中庭與大空間之建築，則無明訂，有必要採行性能式之設計，才能滿足大空間建築對於火災探測之設計需求。

由上表可知，在 15 公尺至 20 公尺間，能偵測到火警者僅剩離子式、光電式與火焰式等三種。

依照上述內容，差動式偵測器依其偵測熱（或高溫）之原理可將其分類為差動式集中型、差動式分離型，係為一種捕捉火災高熱，並向受信機發出火警信號等功能之探測器

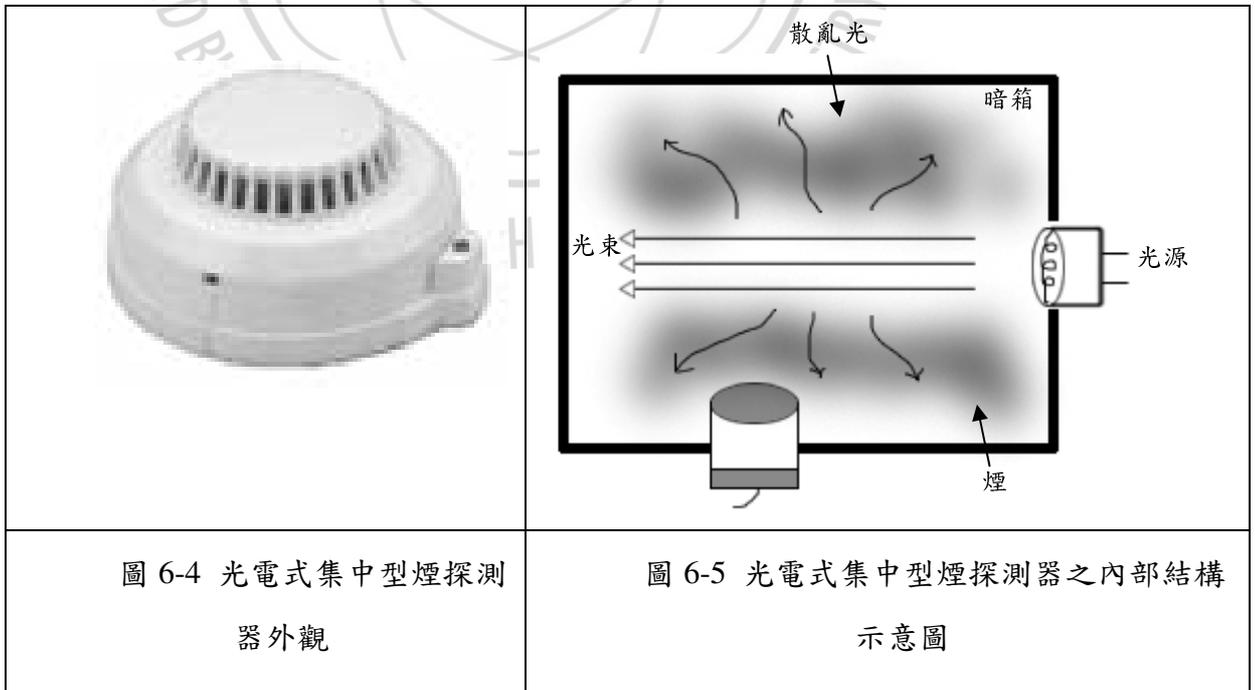
有關熱探測器之運作原理如述：通常定義為「周圍溫度上昇率達至某速率以上時，造成局部區域熱效應而觸發火警動作之探測器」，當探測器周圍溫度快速上升而達到火災前期標準時（動作溫度），探測器內部會膨脹而壓迫感應浪板使金屬接點導通回報火警受信總機，其外觀與內部結構分別如圖 6-2 與圖 6-3。



鑒於煙霧造成可視光線散射物理現象，亦可應用在火警偵測之部分，乃利用光電管使其所射出之光線造成散射，其受光部之光電子能造成電阻變化，繼而觸發警報。而利用此原理做為偵測火警方式之煙探測器則稱為光電式煙探測器。

光電式煙探測器主要可分為兩種類型，即所謂集中型與分離型，若須在小空間裡安裝探測器時，可使用前者光電式集中型；相對於大空間時，則可使用後者光電式分離型。

光電式煙探測器集中型通常定義為「周圍空氣之含煙量達至某一濃度時，部份煙會造成光電子受光量變化而觸發火警動作之探測器」，其結構係在其內部設置一暗箱並完全遮住周圍光線，僅空氣能夠流過。另於暗箱另一側設置燈泡光源，而光束只能以單方向前進，平常於內部僅空氣能流通，光電子並無變化；唯當發生火警時，煙一流入暗箱後，電阻即變化（減少）。而電阻減少引起電流變化後經交換電路檢查出後即向火警受信總機通報火警信號，其外觀與內部結構，分別如圖 6-4 與圖 6-5 所示。



光電式分離型煙探測器係為了防止香菸等局部地區煙氣所引起之假火災動作起見，故發展出適用於大範圍之光電式分離型探測器。通常定義為「周圍空氣之含煙量達至某一濃度時，大空間範圍內煙之累積量會造成光電子受光量產生變化而觸發火警動作之探測器」，此儀器乃由一傳送端與接收端所組成，由傳送端送出訊號並由接收端處理傳送端之訊號強弱，若光線路徑中遇到煙層遮蔽時，將影響光電子受光量之多寡，導致光線散射與電阻減少，繼而產生電流變化引發火警信號。其外觀與偵測原理如圖 6-6 與圖 6-7 所示。

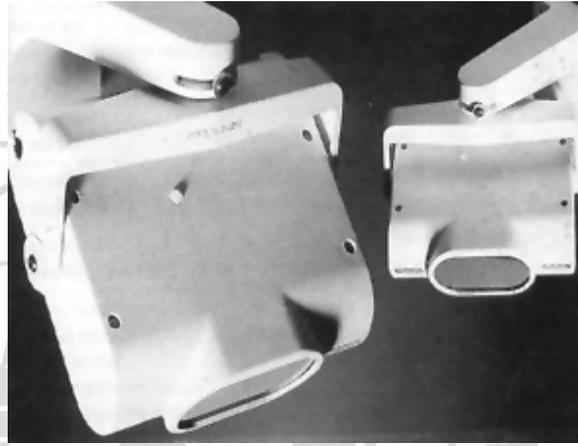


圖 6-6 光電式分離型煙探測器外觀

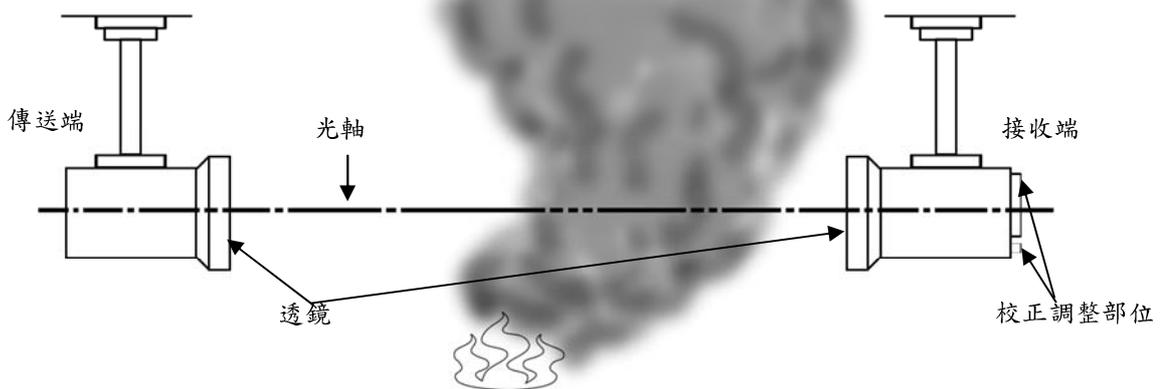


圖 6-7 光電式分離型煙探測器偵測原理

火焰式探測器係一能捕捉到火災時所產生之火焰而自動將警報信號傳向火警受信機通報之探測器。火災初期並不一定會產生火焰，以致火焰探測器之機能不見得會發生效果。因它只限於某些地區，例如防火建築物通道部分（通道與建築物合成一體而視其為構造物之通道部分）才需設置此種火焰探測器，其外觀結構示如圖 6-8。



圖 6-8 火焰探測器之外觀

3. 煙氣層流現象對於偵煙探測器之影響分析及對策

一般而言，在大空間中庭頂部下層之部分常會因為日光照射或熱輻射等效應而使該處空氣受熱。此熱氣層形成一道阻隔，使當火源燃燒之煙氣無法到達而被偵知，稱為「煙氣層流現象」(Stratification)之產生，有關挑空中庭與大空間煙氣層流現象之形成，示如圖 6-9 所示。

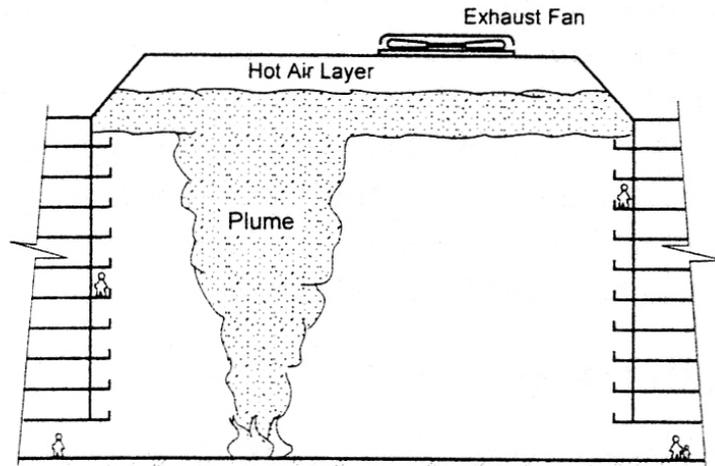


圖 6-9 挑空中庭與大空間火災時所形成煙氣層流現象

火災時其煙柱平均溫度示如圖 6-10，由圖中可知平均煙柱溫度仍比熱空氣之溫度更低。故中庭頂部下方若形成了熱空氣層，煙層則無法到達中庭頂部之排煙口，且裝置於其上之煙偵測器亦無法做警報之動作。

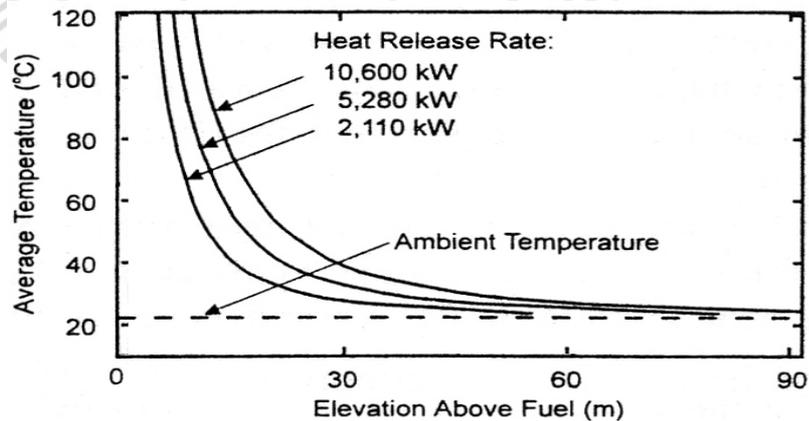


圖 6-10 位於大空間底部之火源其產生煙柱之平均溫度圖

針對分層之現象，以下有幾種探測器安裝方法可克服：

1. 裝置向上式之光束偵測網格 (Grid) :

此方法無論是否有前述之分層現象狀況皆能夠快速偵測到煙層之成長，可利用一個或多個探測器可構成一交叉火警偵測網格，示如圖 6-11。

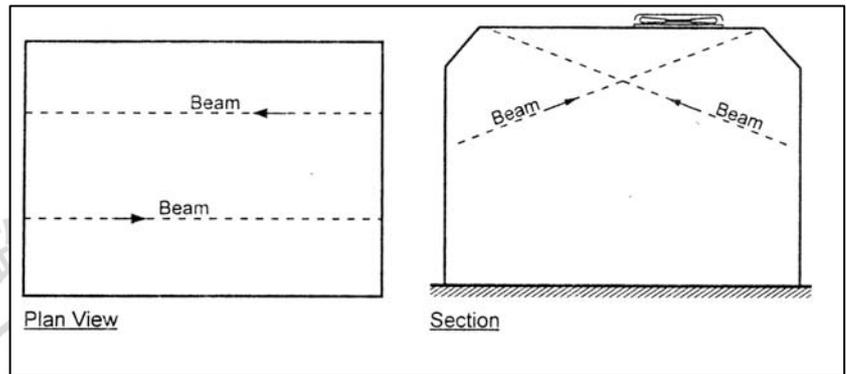


圖 6-11 大空間建築內裝置向上式之光束偵測網格

3-1 案例分析

以下以某高鐵車站為例，加以說明。由於原建築設計外型即已類似一鳳凰起飛之形狀，因此左邊較低右邊較高。採用光電分離型偵煙探測器至左下方上射至右上方之方式進行設計。當火災發生時，濃煙之遮蔽率達到一定程度(約 40%)即觸動警報。經全尺度實驗結果顯示，實際之 5 MW 火災發生於購票大廳時，於 27 秒即觸動警報，設計極為成功。

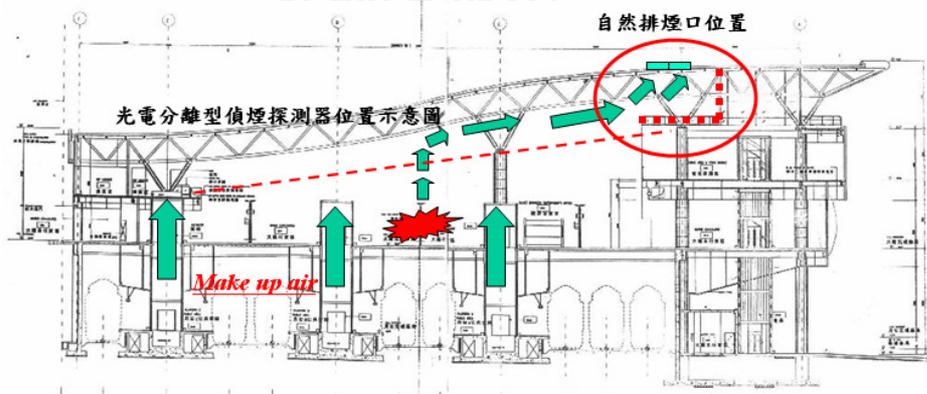


圖 6-12 某高鐵車站設置向上式之光束偵測網格示意圖

2. 裝置水平式之光束偵測網格：

為了減少誤報之情況，吾人可在中庭頂部裝置多個光束式偵測器，其次在較低之煙層再額外裝置偵測器，形成兩道防線。當火災發生時，第一道防線發出警報，此時相當於通報防災中心人員將注意力集中於此進行確認。待第二道防線亦被觸動，且人員確認無誤，再啟動緊急運轉程序。此種中間加一道人工確認之半自動系統，反而是世界設計之主流。因為，前此曾有設計只有一道防線之全自動系統，該場合為一飛機停機坪，即維修中心。結果當時發生誤認為火災之事件，而自動泡沫系統自動噴灑，結果是昂貴的飛機及儀器設備全數報銷，損失不貲。

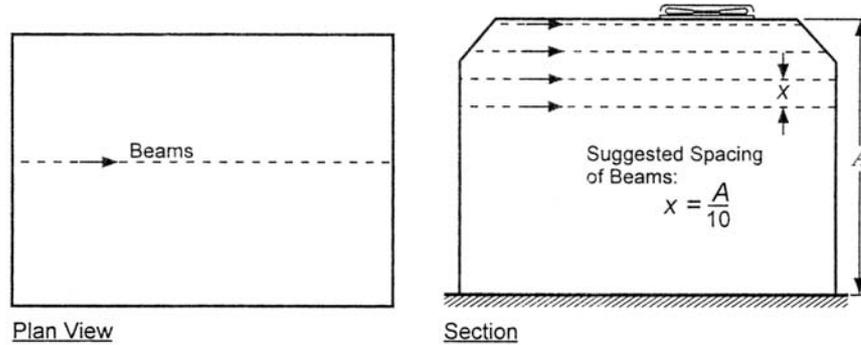


圖 6-14 空間建築內裝置水平式之光束偵測網格示意圖

3-2 案例分析

今以 L 大樓為例，加以說明。本大樓於 2F 及 12F 共設置兩道光電分離型探測器之防線。同時，於 2F 鄰近中庭區再加設火焰型探測器兩組，經全尺度實驗結果，火災鳴動時間各為 15 秒及 25 秒，性能良好。

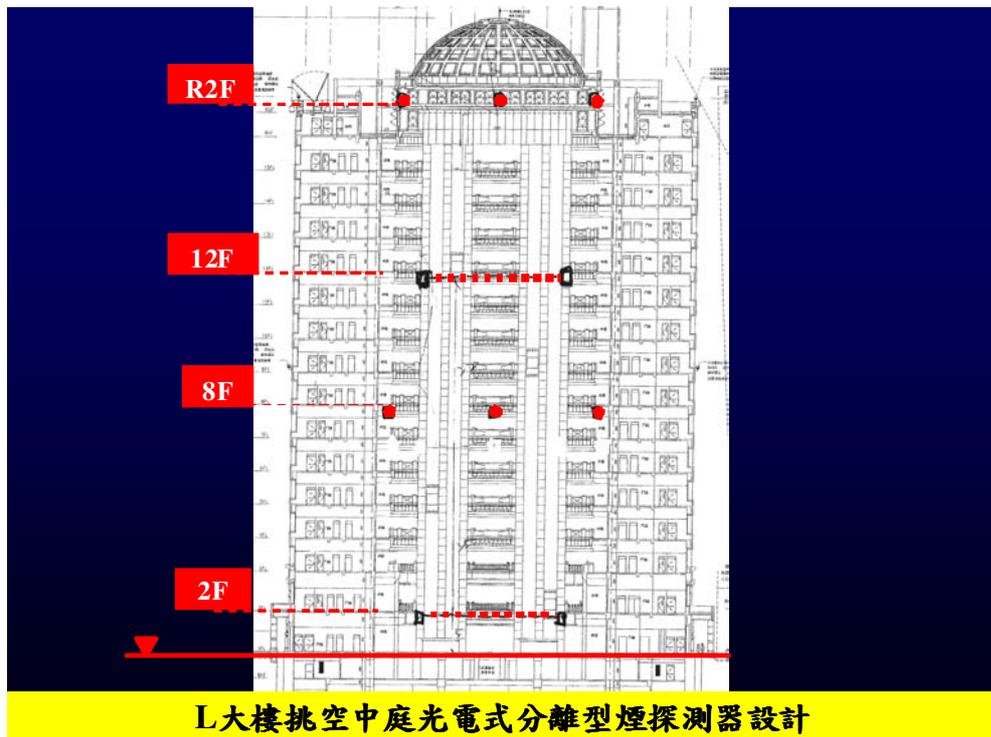


圖 6-13 L 大樓大空間建築內裝置水平式之光束偵測網格示意圖

4. 火災偵煙探測器鳴動時間之全尺度實驗印證

為了進一步分析火災偵煙探測器之特性於內政部建築研究所台南(歸仁)防火試驗室之大空間綜合實驗場進行了全尺度實驗印證。此亦為我國首度對於偵煙探測器進行之系統化實驗印證。

下圖所示為所進行知各類型偵熱、偵煙、及火焰型探測器之安裝位置圖。

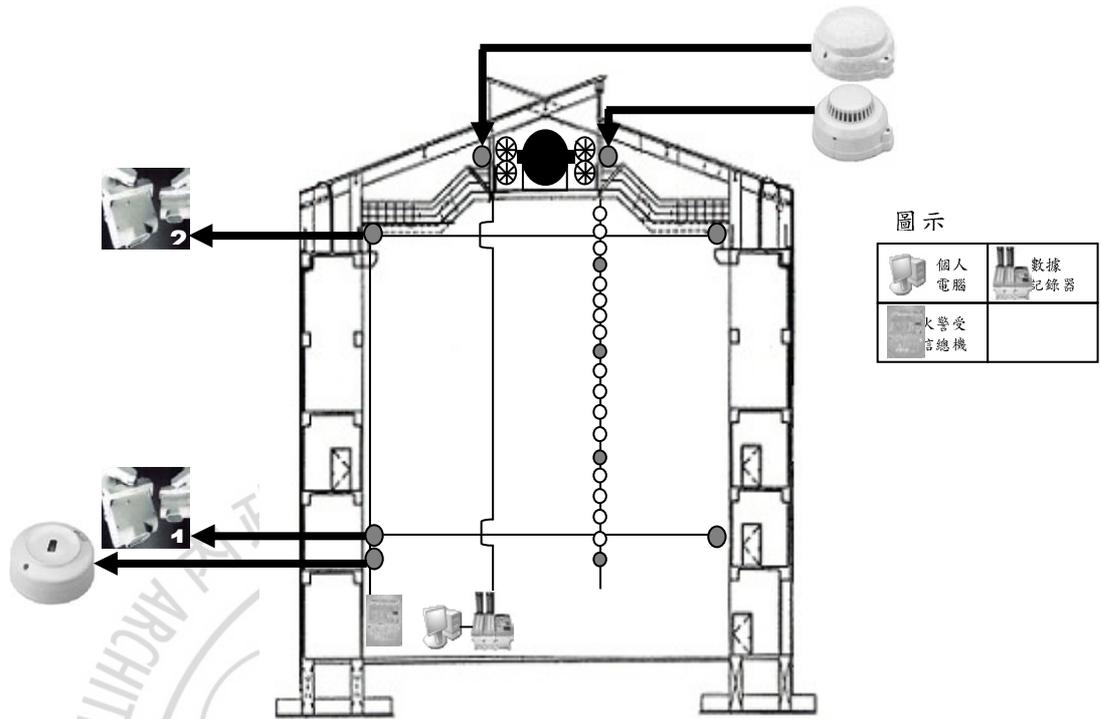


圖 6-26 本實驗所安裝之儀器與設備配置示意圖

其中，光電分離型偵煙探測器共分為兩組，分別於離地 6 公尺與離地 21 公尺處形成 2 道防線。其佈置原則同上節所示。

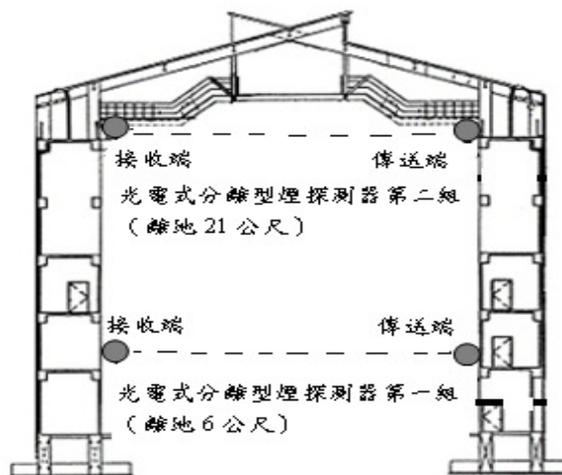
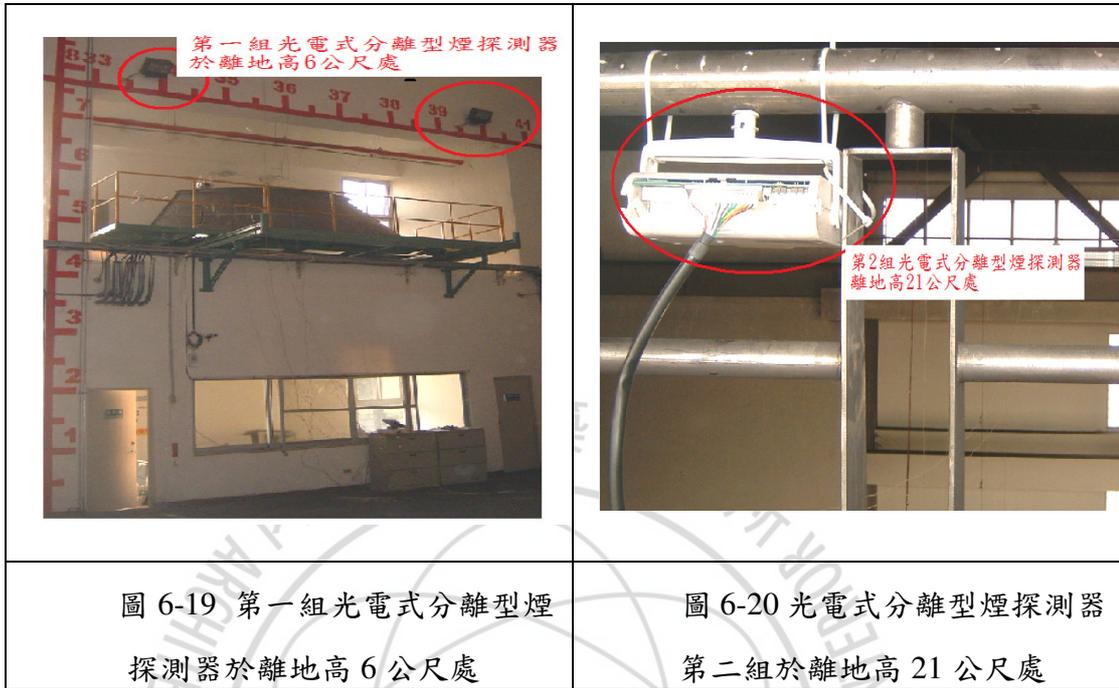


圖 6-18 本實驗所安裝使用之光電式分離型煙探測器位置示意圖

下圖所示為於現場實際之探測器安裝位置。



下圖所示為集中型偵煙及偵熱探測器之安裝位置。皆於離地 22 公尺處。

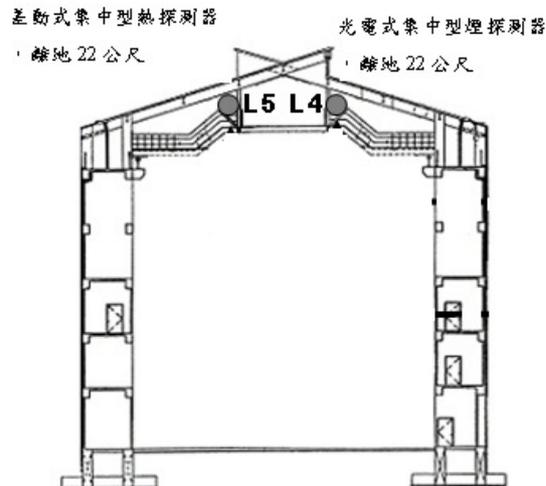


圖 6-21 本案所使用之集中型偵熱及偵煙探測器位置示意圖

下圖所示為於現場實際之探測器安裝位置。

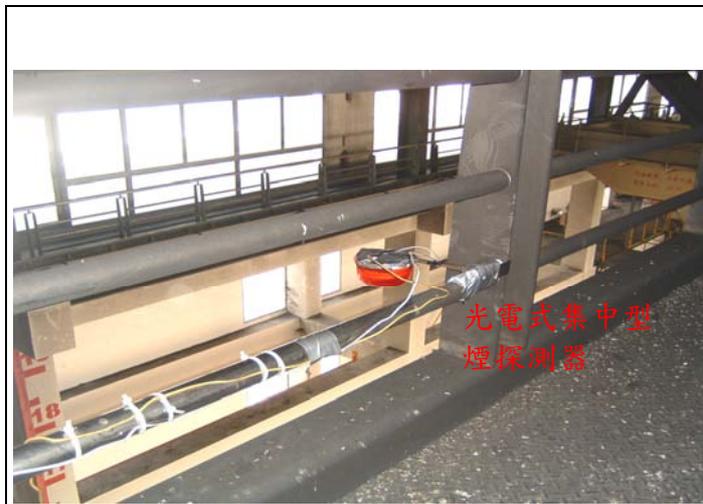


圖 6-22 光電式集中型煙探測器於實驗場地之實際佈置圖



圖 6-23 差動式集中型熱探測器於實驗場地之實際佈置圖

上述各類型探測器之訊號皆進入受信總機迴路進行紀錄，可忠實的呈現於火災發生後其鳴動之時間及次序。

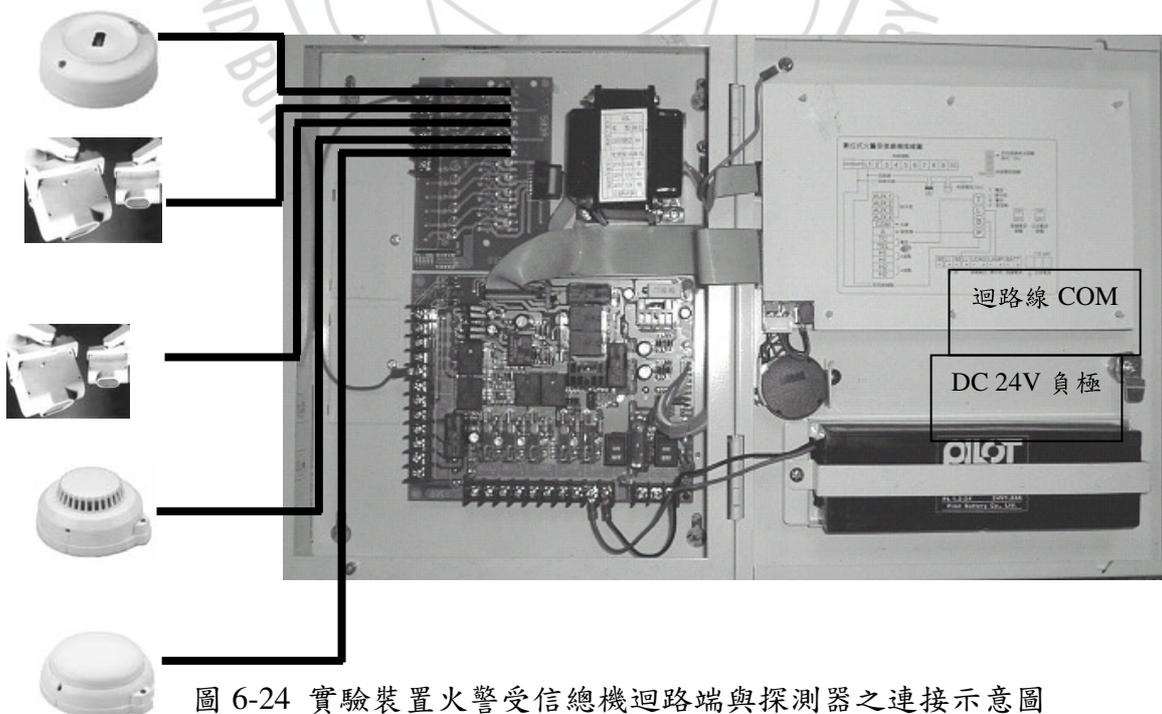


圖 6-24 實驗裝置火警受信總機迴路端與探測器之連接示意圖

另外，由於本實驗之進行乃以汽油盤進行之熱煙實驗，最大規模為 5 MW。因此，同時以熱電偶儀器樹及燈泡樹分別量測及紀錄其火場濃煙溫度與煙沉積速度，再由微電腦進行自動之數據存取。

<p>此為熱電偶儀器樹及燈泡樹安裝情形。</p> 	<p>下圖所示為所採用之電腦自動存取系統。</p> 
<p>圖 6-25 本實驗所使用之數據存取記錄器與個人電腦</p>	<p>圖 6-26 裝設燈泡束以量測煙層高度於實驗場地之實際佈置圖</p>

本防火實驗中心設置有良好之可變頻機械排煙設備，可模擬不同排煙量下之大空間火災煙控系統性能，設備精良，為目前亞洲地區最大型之大空間全尺度實驗場之一。



圖 6-27 實驗場地貓道上方之排煙系統實況圖

5. 火災偵煙探測器全尺度實驗之進行步驟

火災偵煙系統之全尺度實驗進行步驟如下：

1. 將正確數量之火盤放置在預定位置上：此步驟將依照所欲模擬之火災規模，放置正確數量之火盤。例如，若要模擬 3 MW 的火災規模，則需放置 15 個 45 公分直徑之汽油火盤。
2. 火場四周放置滅火設備：於火場四周放置滅火設備，一來能預防火場突發狀況之發生，二來亦需要熄滅「點火把」之火焰。
3. 煙層高度指示系統就位：本正式實驗進行時，將開啟燈泡束，並分派人員於地面及不同樓層進行觀察火場煙沈積情形，利用攝影機記錄存檔。同時，自動數據存取系統亦會同步紀錄濃煙之溫度分布，藉以判斷煙層高度。
4. 確認機械排煙風機之狀況：指派專人負責操作，並確認實驗當時貓道上方機械排煙口之「關閉」或「開啟」狀況，及運轉頻度(Hz)以調整風量大小。
5. 火盤注入燃料：於預備實驗時首先對於汽油之燒失率以電子秤進行紀錄，並做出燒失油料(c.c./s 或 g/s)與火災規模(MW)間之關係式。再依所得之結果，將適當數量之燃料注入火盤。
6. 數據存取記錄器開始記錄並計時：啟動數據存取記錄器開始記錄熱電耦儀器所獲得之溫度數據。並開始倒數，準備點火進行實驗。
7. 點火，煙層上升，觀察煙流動特性與煙沈積現象：倒數結束，以「點火把」點燃火盤。各觀察員與攝影機及自動數據存取系統，觀察並記錄火場煙流動特性與煙沈積現象。
8. 點火後，當第一組探測器觸發警報後，並經 30 秒確認為火災後，即啟動機械排煙風機，而於 60 秒後啟動完成。
9. 火盤自然熄滅：讓火盤燃料自然燒盡，且待火盤溫度下降至室溫，準備下次實驗使用。
10. 實驗討論與數據整理：工作人員收集並整理實驗數據，如有缺失，立即改善。準備再行下一實驗項目。其步驟流程可示如圖 6-18。

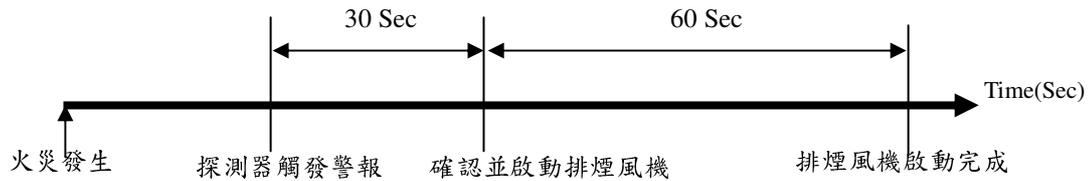


圖 6-28 火災探測器全尺度實驗排煙風機啟動時間示意圖

5-1 火災規模 5 MW 之全尺度實驗結果分析

火災情境描述：

假設火場發生 5 MW 之火災，亦即使用 25 個油盤。點火後，等待第一組探測器首先觸發警報後，通報人員並進行確認。確認後，將排煙風機啟動，並設定其運轉頻率為 40 Hz，相當於提供排煙風量約為 $1.36 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ 。紀錄探測器鳴動時間，情形如表 6-2 所示。

表 6-2 火災規模為 5 MW 之探測器鳴動時間實驗結果

探測器名稱	火焰探測器	光電式分離型煙探測器第一組	光電式分離型煙探測器第二組	光電式集中型煙探測器	差動式集中型熱探測器
探測器縮圖					
探測器編號	L1	L2	L3	L4	L5
鳴動時間(s)	14	22	43	45	160

煙沈積速度與鳴動時間對照：經由熱電耦儀器樹與數據存取記錄器所收集之火場溫度數據，利用 NFPA 92B 之 N 百分比法進行煙層之判定，其結果與探測器鳴動時間對照圖示如圖 6-29。

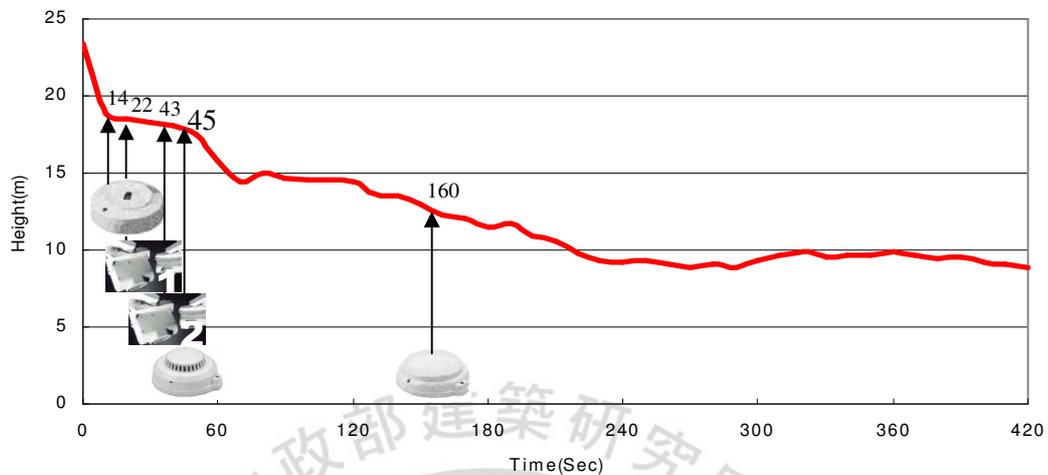


圖 6-29 火災規模為 5 MW，排煙量為 1.36 cmm/mP^{2P} 之煙沈積與鳴動時間對照圖

實驗小結：

由上圖與觀察火場之錄影帶得知，煙層最低點高度在離地面約 8 公尺處。火焰探測器於 14 秒左右即觸發警報，隨即依序是光電式分離型煙探測器第一組與第二組，於 22 秒及 43 秒鳴動，且光電式集中型煙探測器於 45 秒鳴動。差動式集中型熱探測器亦在 160 秒大空間環境達到動作溫度並鳴動。

此結果充分顯示於大空間之應用上，火焰型探測器反應靈敏，近年來許多大型水槍皆結合紅外線等探測器進行，即屬此理。光電分離型探測器顯示良好之性能，於國內外先進國家設計案例中占最大之使用率，其理甚明。光電集中型探測器則由於偵測器位於中庭之頂端，因此鳴動時間較晚，此於大空間若容積大之時，將更明顯。可做為良好之複式備用設計(redundancy)。而差動式集中型熱探測器由於需待大空間整個溫升率到達設定值，因此在大空間體積龐大之時，恐怕鳴動時間還要更晚，不太適當。

6. 火災偵煙探測器全尺度實驗總結

本實驗中安置於大空間建築中之火警偵煙系統，因各有一定之偵測極限，必須依照其空間特性做適當之配置，如此方可於實際火災發生時，人員能及時警覺並順利逃生。

在預備實驗中，因火災之規模甚小，以致產生之煙量與熱輻射量皆無法達到傳統火焰探測器與集中型熱煙探測器之警示標準。故在火源點燃後於全程實驗裡皆無法觸發火警警報，再再顯示傳統式偵熱偵煙及火焰探測器若配置於大空間中有其盲點。

而於進行正式全尺度實驗時，因火災所產生之發煙量與熱輻射量規模到達一定量，故於火災規模 5 MW 時，所有配置之探測器皆能鳴動。然而由實驗比對圖表可知，傳統式熱煙探測器之鳴動時間依然極長，且當其鳴動時，火災所產生之濃煙已下降至本實驗場地之 6 樓走道區，已影響人員疏散與生命安全。

火焰探測器在正式全尺度實驗中，因靠近偵測火源且熱輻射量使其動作靈敏，故在點燃火源後不久即觸發警報。但若火災之發生點不巧遠離其偵測角度與標準，則如預備實驗中之情形一樣無法有效偵測火警，配置依然形同失效。

對於光電式分離型煙探測器而言，無論火災之規模與發煙量為何，於預備實驗及正式實驗中皆能展現良好之偵測特性。且比照圖表得知，探測器鳴動時其煙層仍然在本實驗場地 6 樓走道區之上，若能與機械排煙風機做連動，可有效抑制煙層下降，增加人員逃生時間。

總體而言，大空間建築若以熱感知偵測器在應用上有先天上的困難，因此大體皆會應用偵煙探測器。其中，以光電分離型最為常用。經由良好之規劃可於第一道之觸動作為警告，待第二道再觸動時作為確認，可收良好之效果。當然，火焰探測器具有最快速與靈敏之感知，於大空間中常配合長距離水槍使用，台北小巨蛋等亦皆如此。

對於如高科技廠房無塵室等大空間，對於煙害風險極高之場所則常以極早偵煙感測系統為之（Very Early Smoke Detection，簡稱 VESDA 系統）。此種系統經由定期取空氣樣本做為分析判斷，有如僱了一個「虎鼻師」無時無刻在聞味道，因此，連火災早期之微燻味皆可分辨出來，於台積電，聯電等無塵室皆大量使用。香港赤臘角機場之出境大廳亦採用之，讀者下次轉機時可抬頭觀看。





第七章 排煙系統補氣之設計應用分析

1. 設計理念分析

於大空間建築發生火災時，無論利用頂部蓄煙或進行機械或自然排煙，皆必須於適當位置設計補氣 (Makeup Air)，以便造成推拉 (Push Pull) 之有效氣流組織，使煙控系統發揮最佳之煙控性能。此時之補氣量設計、補氣口位置、與補氣口開啟時機，便成為煙控系統補氣設計時極重要之考量因子。

若補氣量不足，則此時的機械或自然排煙形同「抽真空」。而若補氣量太大，則火場由於形成大的紊流，而使煙沈積速度急劇加大，造成人員避難上極大的危險。

其次，補氣口位置如果不適當，亦會形成極大的後遺症。亦即若直接補氣於火源附近，則將造成部份助燃之結果。若補氣位置太高，則煙層組織被破壞，造成煙層紊流無法控制。

補氣口開啟時機之選擇，亦會影響到煙控性能之良莠。補氣口開啟時間太早，則有可能破壞煙柱形狀，進而破壞煙層分層。而補氣口開啟時機太慢的話，則煙層下降相對迅速，嚴重危及人員安全。

2. 我國消防相關法規

大空間中庭煙控系統之補氣方式，可採用機械進氣或自然進氣方式，於 NAPA 92B 中，亦提供了重要參考依據。在文中指出，補氣系統之出口風速不可破壞煙柱結構。其建議補氣系統之出口風速需在 1 m/sec (200 fpm) 以下，以免對煙柱發展造成影響。此亦為國際間較具權威性有形之於文字的相關記載。

我國對於大空間建築煙控系統設計，既無相關設計規範可資依循，當然對於補氣亦無相當規定，因此有必要參考國外先進國家之相關補氣設計與規範進行系統化研究分析。

● 對於我國大空間建築煙控系統設計對於補氣之補強建議

立即可行建議為於目前「各類場所消防安全設備設置標準」第三節排煙設備第一百八十八條中，應增加「排煙系統應設置適當之補氣口，且位置需位於壓力中性面以下」之規定，可立即做為我國目前煙控系統補氣設計之主要依據。

未來針對煙控系統補氣設計之中長期建議，可根據完成相關煙控系統補氣全尺度熱煙實驗結果，將補氣設計之壓力中性面計算書列入於挑空中庭及大型開闊空間建築物煙控系統設計之審查要項之一，使得我國之性能試驗設計能與 NFPA 92B 設計規範相接軌。

3. 大空間建築補氣設計之理論分析

於探討大空間建築煙控系統補氣設計時，首先須研究火場內煙流動特性。今先介紹「區域模式」(Zone Model) 之物理意義。

區域模式是將建築物空間劃分若干個(一般分為兩個)區域，每個區域內再劃分成物理、化學性質均勻的高溫煙層與低溫空氣層。並利用能量、動量、質量及組成成份守恆原理，預測火災的成長、煙的流動，以及每個區域內的溫度、濃度分佈情形。

區域模式之求解方式為隱性 (Implicit) 型式，係利用高溫煙層與低溫空氣層之總守恆方程式與數值方法，代入輸入條件，迭代求出高溫煙層與低溫空氣層之物理特性。區域模式在計算上較場模式簡單、省時，但區域模式只能預測平均的煙流動情形，無法預測實際火災發生時建物內詳細之流場與溫

度場分佈。

區域模式之基本假設條件為：

1. 氣體視為具有等分子重及等比熱的理想氣體
2. 自由邊界上的質量交換是由於壓力差或者是剪力影響，一般這些皆由自然或強制對流造成
3. 燃燒被視為質量與能量的來源，即表示無機械作用
4. 整個氣體層的水平截面積是等面積
5. 在固體邊界流體的摩擦效應於本模式下予以忽略
6. 由於浮力的結果周遭外氣流入進行補充，再進入火焰區；依據經驗，流進的補氣速度與火羽上升的垂直速度呈線性關係。

另一方面，「場模式」(Field Model) 主要是以 Navier-Stokes 方程式為架構，配合燃燒與輻射等方程式，將火場細分為數個控制體積，進行火場內煙流動特性之分析。而「區域模式」無論是在計算上、或是火災行為與性質狀態上之探討都較「場模式」要來的簡便，因此適合工程上用來解釋煙控系統之補氣設計。

區域模式之主要概念為，若空間發生火災時，可將內部空間劃分為兩大層狀區域，亦即上方高溫煙層及下方空氣層。因此若以區域模式的概念來觀察建築物內部任一起火空間的火災行為與性質狀態，則區域內部之氣體質量、能量、化學現象以及狀態等變化，如下圖 7-1 所示。

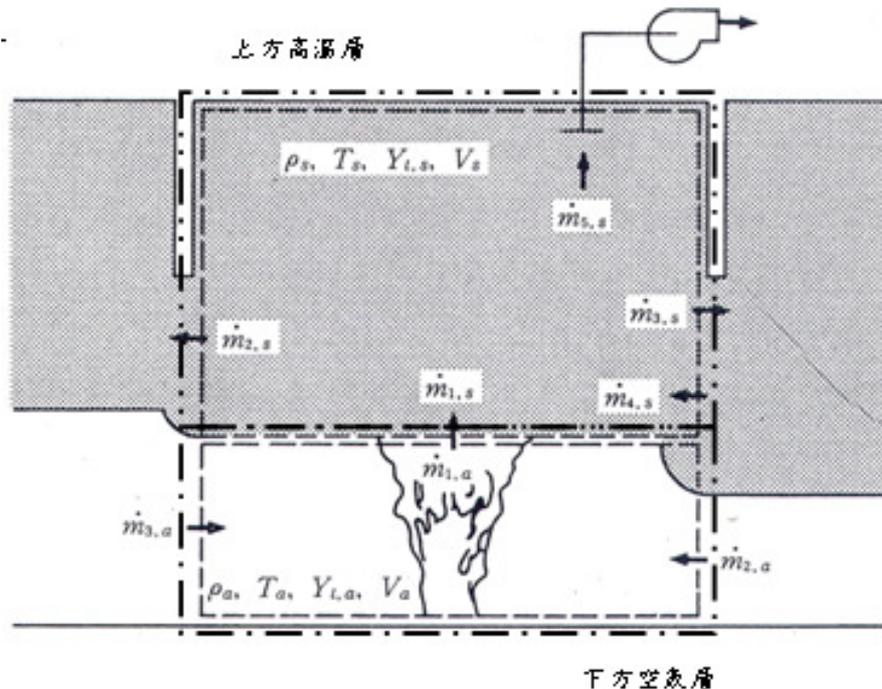


圖 7-1 「區域模式」之二層區域概念示意圖

圖 7-1 中，其空間區域內部之質量變化為通過邊界流入與流出質量的總和。

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \sum_j \dot{m}_j \quad (4-1)$$

其中

ρ ：區域內部氣體之密度 (kg/m^3)

V ：區域之體積 (m^3)

t ：時間 (sec)

\dot{m} ：經由邊界流入或流出區域的氣體質量流率 (kg/sec)

其內部氣體質量的變動即為流動氣體經由各邊界進出區域的總累加值；其中為表示空間與鄰近空間之關係，所以會在各質量流率參數前面添加正負符號；流入區域之質量流率為正，流出區域之質量流率則為負。無論是從鄰接空間透過開口流入之空氣流或由此空間流出的熱空氣流、煙，或者是藉由各防火防災器具在區域邊界上產生給氣或排氣的動作，這些對於區域內部氣體質量變化有所影響的因子，都必須包含在討論的範圍當中。

因區域之體積 V 將會隨著時間而有所變化，所以在具體進行計算時，必須考慮火災空間中的水平斷面的面積與高度。因此，於式(4-1)左式中水平斷面之面積不變化時，則其區域之體積 V 則可表示為 $Ad(\rho Z)/dt$ ，其中 Z 為區域之厚度。

當建築物發生火災時，建築物內部起火空間將會形成兩部分，其分別為上方高溫煙層與下方空氣層。而此時將可使用上述之雙層層狀區域性質計算方程式來進行分析討論。

當利用雙層層狀區域性質計算方程式進行討論時，則假設建築物內部空間會因不同之氣體性質，被分割為上方高溫層與下方空氣層；且無論是上方高溫層或者是下方空氣層，其層狀區域內部之氣體分佈都是均勻的，故可以將其層狀區域內部任一點之物理性質都視為相等。這樣的假設，主要是無視層狀區域內部溫度與氣體流動之實際分佈，以平均值來代替層狀區域內部之各計算參數，如此一來則可用最小限度的變量來進行火災行為之預測。

3. 壓力中性面與補氣設計之關係

當大空間建築發生火災時，火場的高溫影響了煙與空氣的密度，再由於密度的不同而導致火場內外的壓力差，因而產生了流動的驅動力，如下圖 2.2-1 所示。

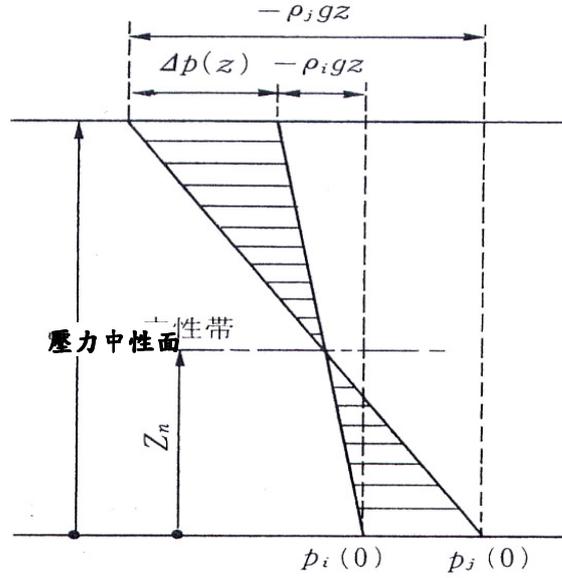


圖 7-2 火場壓力中性面之示意圖

因此，假設在大空間火場當中若基準壓力為 $p(0)$ ，則在基準高度 z 上之點壓力 $p(z)$ 則為：

$$p(z) = p(0) - g \int_0^z \rho(z) dz \quad (4-2)$$

若假設大空間建築內部高度從 $0 \sim Z$ 範圍之溫度為定值，則可將上式寫為

$$p(z) = p(0) - g\rho z \quad (4-3)$$

在煙流動之相關計算當中，若要計算基本高度壓力與外氣壓力之壓差，則代入相對壓力差之觀念將會比較簡便。因此，下列各計算式之壓力差皆取相對壓力來表示。若兩鄰近空間 i 、 j ，氣體密度分別為 ρ_i 與 ρ_j ，而基準壓力分別為 $p_i(0)$ 與 $p_j(0)$ ，見圖 2.2-1。故位於高度 z 之壓力 $p_i(z)$ 與 $p_j(z)$ 為

$$p_i(z) = p_i(0) - \rho_i g z \quad \text{與} \quad p_j(z) = p_j(0) - \rho_j g z \quad (4-4)$$

故兩空間中任意高度 z 之壓力差為

$$\Delta p(z) = p_i(z) - p_j(z) = p_i(0) - p_j(0) - (\rho_i - \rho_j) g z \quad (4-5)$$

其中，兩空間壓力分布相等之高度，稱為壓力中性面 (Neutral Pressure Plan, NPP)。因兩空間中之壓力差為零，故中性帶高度為 Z_n 可參照式(4-5)可得：

$$Z_n = \frac{p_i(0) - p_j(0)}{(\rho_i - \rho_j) g} \quad (4-6)$$

當大空間建築頂部進行排煙時，其代表此時頂部排煙口內之壓力大於戶外壓力，故可將煙氣排出戶外。而大空間建築底部有從外部補氣進入時，則代表底部壓力小於外部。

因此，底部至頂部間存在內部與外部壓力差相同之區域，即並無空氣內外流通，為壓力中性面之所在位置。是故若排煙口或者補氣設置於壓力中性面附近的話，則達不到排煙或者補氣之目的。因此，壓力中性面與排煙及補氣設計之關係相當密切，於實際設計不得不注意此點。

當大空間建築底部補氣口面積（包含其他建築縫隙等）相當於排煙頂部排煙口面積時，其壓力中性面所在位置，約位於大空間建築之中間部位，如下圖 7-3 所示，詳細位置仍需考慮建築內外壓力差及建築高度等因素。

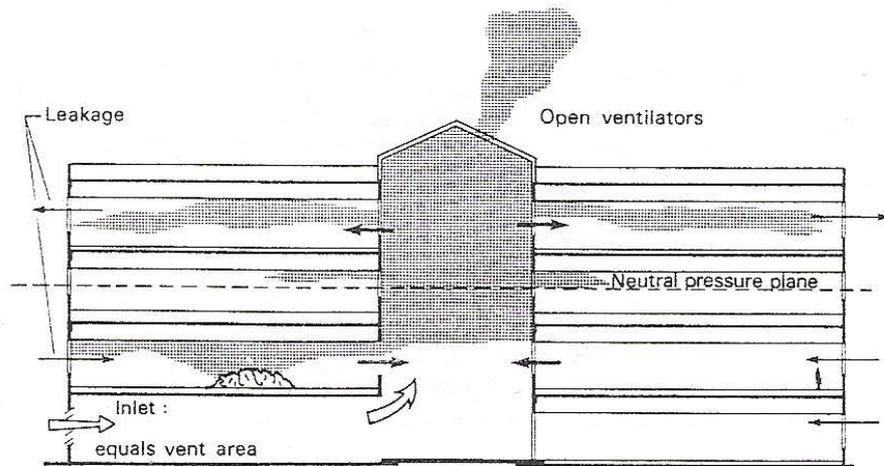


圖 7-3 壓力中性面約位於大空間建築之中間部位

若當大空間建築底部補氣口面積小於排煙頂部排煙口面積時，其壓力中性面所在位置，於位於大空間建築之上部部位，如下圖 7-4 所示。

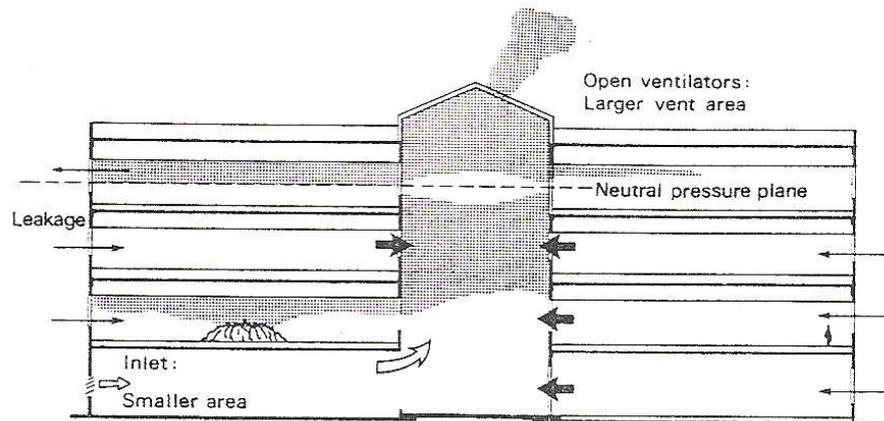


圖 7-4 壓力中性面約位於大空間建築之上部部位

因此，根據圖 7-4 之設計原理，只要大空間建築之壓力中性面仔細控制於適當之位置，則當中性面以下之中庭周圍居室發生火災時，其煙氣將自外圍經由補氣路徑流入中庭內部，而從中庭頂部排出，如下圖 7-5 所示，形成良好的氣流組織。

那麼要如何控制使壓力中性面能位於有利的位置？自然排煙或機械排煙系統遂提供了這個工具。簡言之自然或機械排煙系統提供了以外力改變整體壓力梯度與形狀之機會而其改變程度之大小則由風機容量之大小而決定。

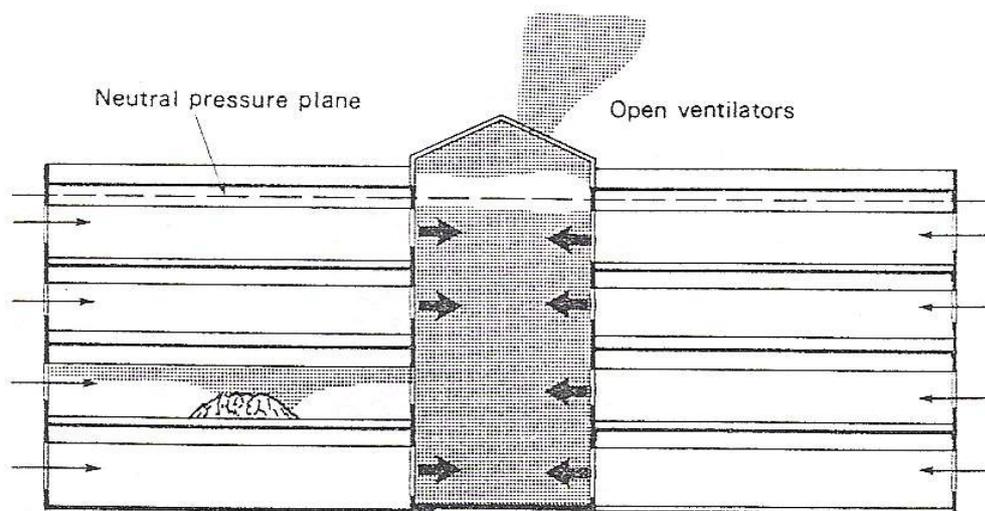


圖 7-5 壓力中性面下方之建築周圍空間將不易受到火災濃煙與高溫之侵入，可確保避難逃生時之人身安全

4. 自然排煙與補氣設計分析

當大空間建築頂部設置自然排煙口時，系統設計示意如圖 7-6 所示。檢視其煙控性能可從兩方面著手，一為質量守恆定律，其排煙量 m_e 等於發煙量 m_p 與補氣量 m_d 之總和。二為壓力中性面之高度，其比補氣口最高高度還高，因此不會蔓延到火災區之鄰近區域。皆可說明設計補氣口不可缺少之重要性。

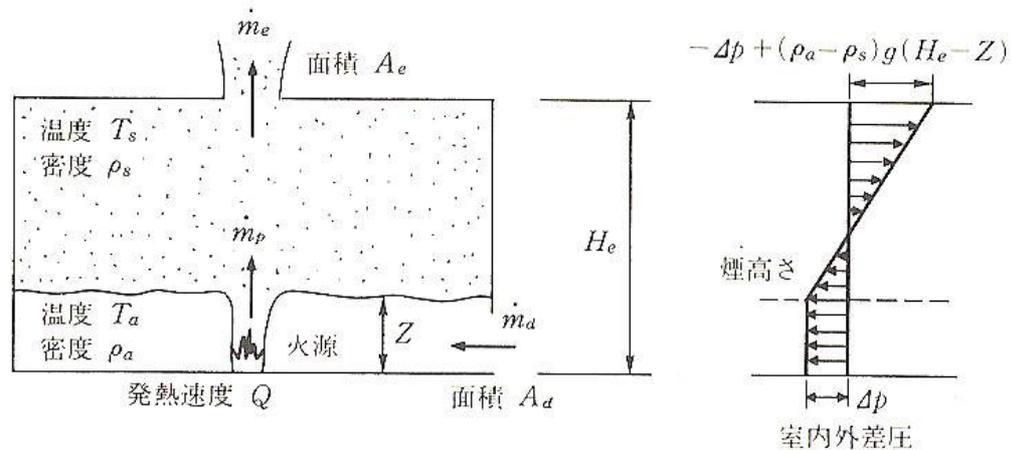


圖 7-6 大空間建築設置自然排煙口與自然補氣口後之壓力分布特性圖

(資料來源：參考文獻 12)

由於大空間建築之自然排煙設計為藉由火場之熱浮力，而將煙氣經由自然排煙口排至戶外。自然排煙系統之排出煙氣質量流率，可用以下簡單代數方程式表示之：

$$\dot{m}_v = \frac{CA_v \rho_0 [2gd_b (T_s - T_0)(T_0 / T_s)]^{1/2}}{[T_s + (A_v / A_i)^2 T_0]^{1/2}} \quad (4-7)$$

其中：

\dot{m}_v 為排出煙氣質量流率

C 為釋放係數

A_v 為自然排煙口面積

A_i 為補氣口面積

ρ_0 為外界空氣密度

g 為重力加速度

d_b 為煙層底部與排煙口之距離

T_0 為外氣絕對溫度

T_s 為煙氣絕對溫度

因此，從式子(4-7)亦可明顯看出自然補氣口面積 A_i 於計算自然排煙系統之排煙量時之重要性。

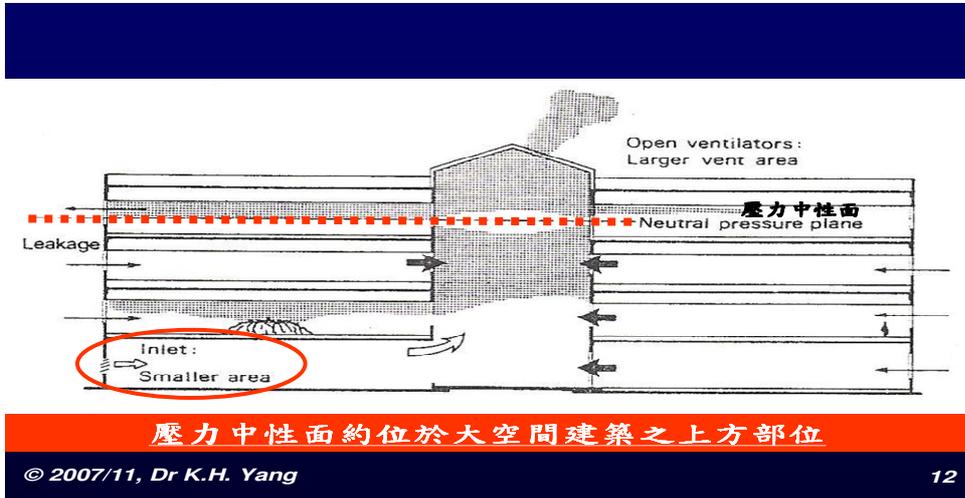


圖 7-7 當補氣口較排煙口小之時，壓力中性面被拉升

4-1 案例分析

今以某 2 個高鐵車站為例，加以說明。於 Z 車站中，其補氣是由月台層至大廳層中間之電扶梯開口部來達成。配合頂部右上角之自然排煙口之開啟，而形成良好之氣流組織。經全尺度熱煙實驗結果顯示，於發生火災後 30 分鐘以上，皆可維持煙層高度於離地 17 米以上，性能良好。

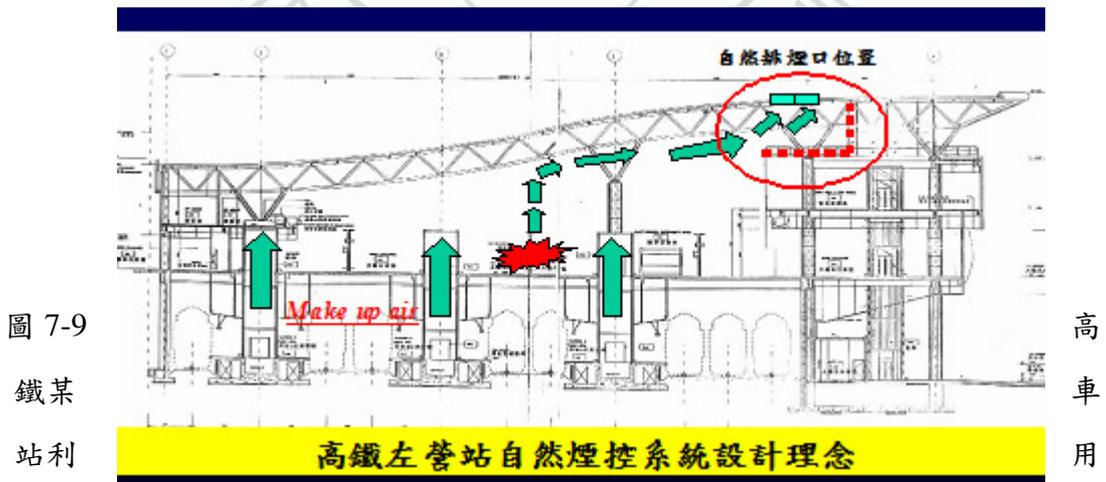


圖 7-9
鐵某
站利

高
車
用

電扶梯開口做為補氣通道，形成良好的推拉氣流組織

於 C 車站中，補氣則由人員進出之大廳開口自動門提供。火災發生時，經由連動使電動之自動門開啟而達到補氣之目的。此車站之自然排煙窗係設計再兩側配合每 1100m^2 之防煙區劃進行。

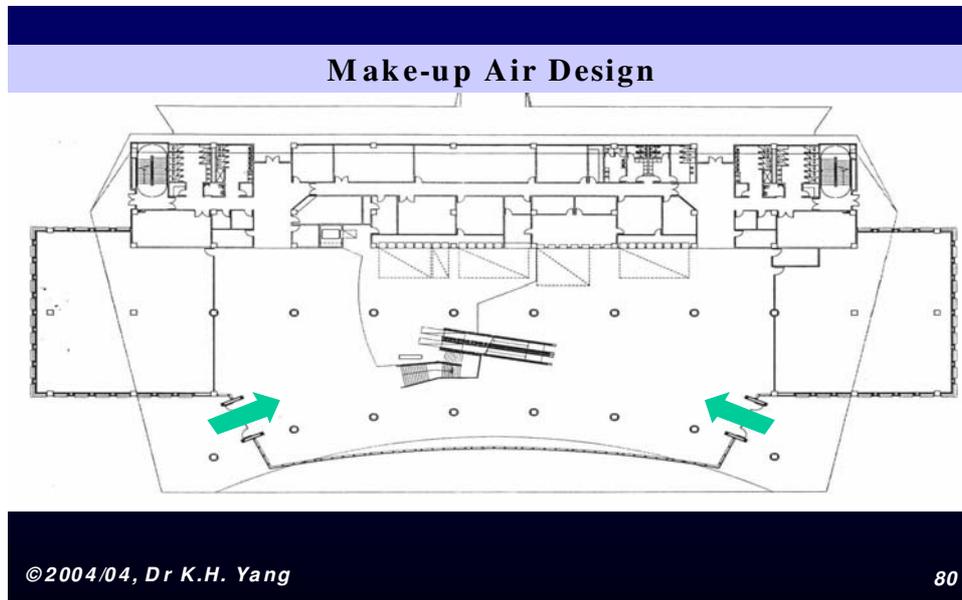


圖 7-11 高鐵某車站利用大廳之正門開啟作為補氣通路之一，因此必須與偵煙探測器連動於火災時開啟

5. 機械排煙與補氣設計分析

其次，若大空間建築頂部設置機械排煙系統時。同樣地，檢視其煙控性能可從兩方面著手，一為質量守恆定律，二為壓力中性面之高度。皆可說明設計補氣口不可缺少之重要性，系統設計示意如圖 7-13 所示。

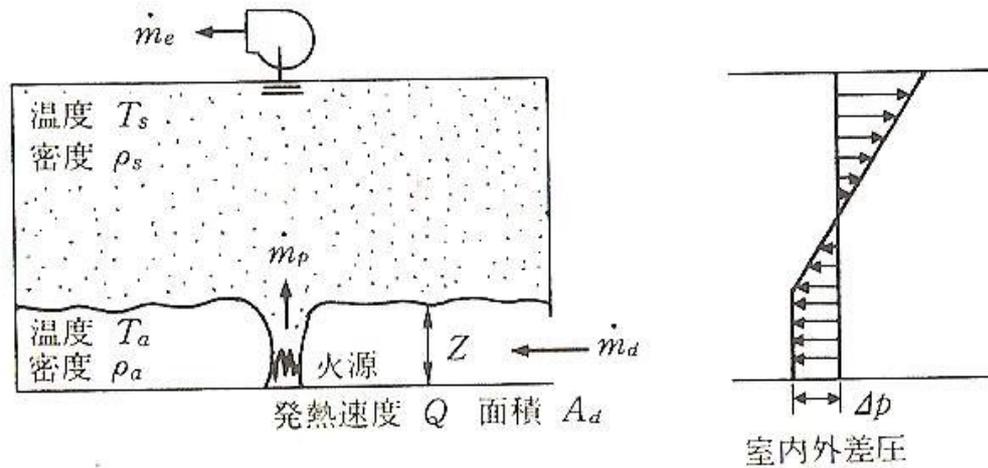


圖 7-12 大空間建築設置機械排煙口與自然補氣口

假設於穩流 (Steady Flow) 狀態下，基於守恆定律，從中庭頂部機械排煙口流出戶外之空氣或煙的總流率，等於從煙層底部下方流入中庭室內之空氣總流率。而流入中庭室內之空氣亦即補氣，此處當中庭頂部為機械排煙設計時，則補氣方式可為自然補氣，或者是機械風機補氣。

簡言之，自然排煙或機械排煙系統提供了改變壓力梯度乃至整體壓力分佈特性之手段。改變之程度則由系統容量，如自然排煙口尺寸或排煙風機容量所決定。而壓力中性點的落點位置則是主要的設計考量。

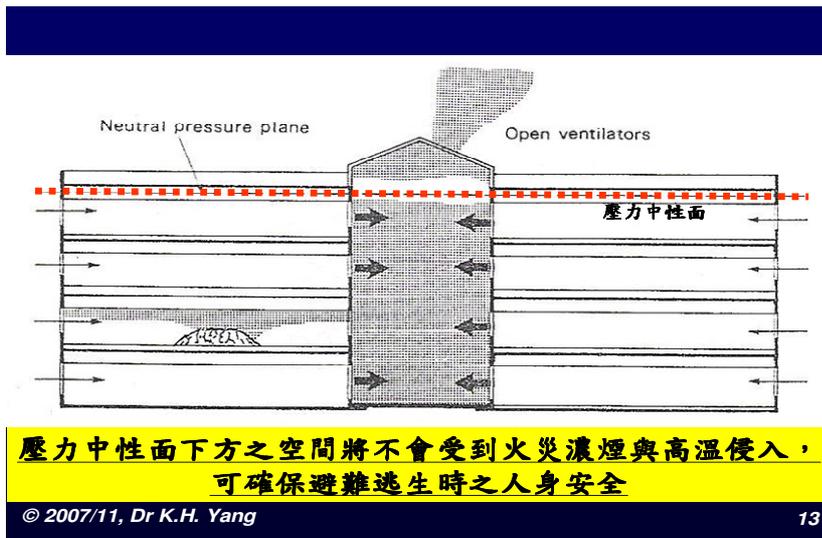


圖 7-13 壓力中性面下方之空間將不會受到火災濃煙與高溫侵入，可確保避難逃生時之人身安全

5-1 案例分析

今以某巨蛋球場為例，加以說明。

由於巨蛋頂部設置有自然排煙窗與機械排煙系統，今以逃生口位置進行補氣，當火災發生時，補氣之氣流組織正好與人之避難形成逆向，形成良好之無煙避難路徑，頗具巧思。

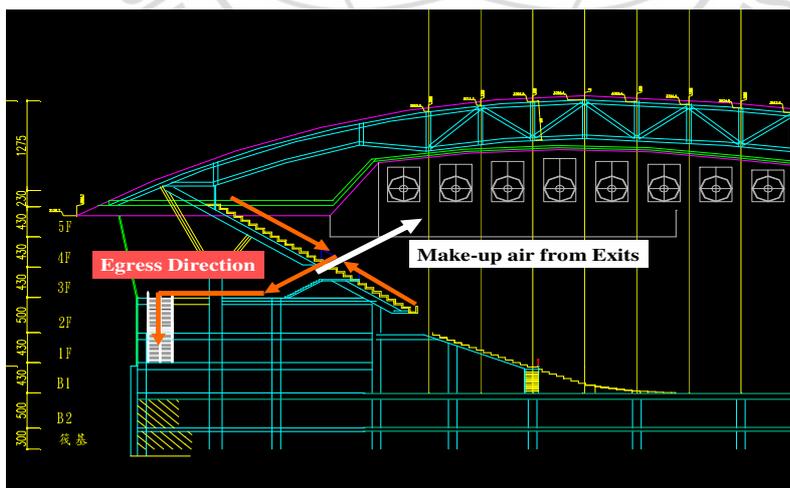


圖 7-14 台北小巨蛋以逃生口位置進行補氣，正好與人之避難形成逆向，形成良好之無煙避難路徑。

第八章 性能式煙控系統設計 3D CFD 電腦模擬應用分析

有鑒於我國近年來大量之現代化購物中心，機場航廈，高速鐵路及捷運系統車站及高科技廠房之大量興建，3D CFD 電腦模擬分析遂成為重要的煙控系統設計工具。於國際間眾多之商用設計軟體中，最為方便使用且具公信力與精確性的，首推 FDS 軟體。由於此軟體 Fire Dynamics Simulator 係美國 NIST(原中央標準局)以公共預算所開發完成，因此公開發行讓全世界免費使用。此亦美國人可愛的一面。此軟體可於 <http://www.fire.nist.gov/fds/> 網址免費下載。其它流行於國際間之商用軟體有些亦具備相似之功能，但一般皆有相當高之租用費用。

以下即以系統化之方式說明如何以 3D CFD 電腦模擬進行大空間性能式煙控系統設計之程序。

1. 設計工具與方法使用之說明(Design Tools and Methods Used)

1-1 工具選用之理由

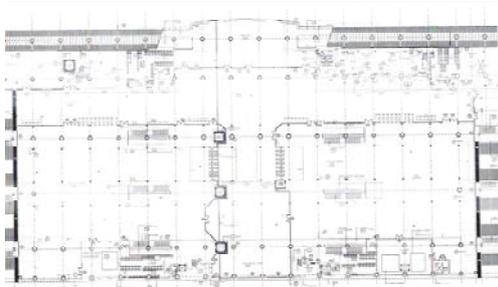
當選定 FDS 軟體後，必須簡述 FDS 之主要架構。原則上 FDS 可分為前處理，計算引擎及計算結果後處理三區塊。

FDS 係利用 LES (Large Eddy Simulation) 模式將整體大空間區分為細小的格點，再依 Navier Stokes 關係式求解溫度場及溼度場等分布而得。

1-2 輸入參數及建築外型等尺寸作為輸入檔

目前 FDS 尚無法將建築設計之 AutoCAD 圖檔自動讀入而變成圖型輸入檔，因此必須經由分割為極小之立體格點組合而成。也因此，其建築外形常成為鋸齒狀。當然，若格點越分越細則鋸齒也會更形平滑。

⊙ Set up the input file



平面圖與剖面圖

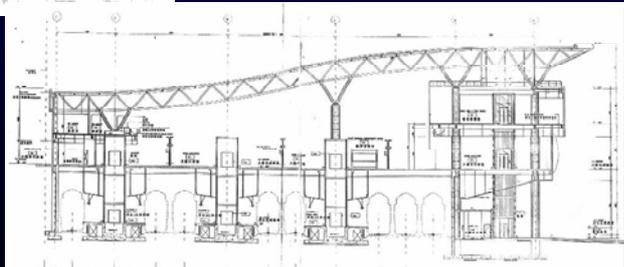
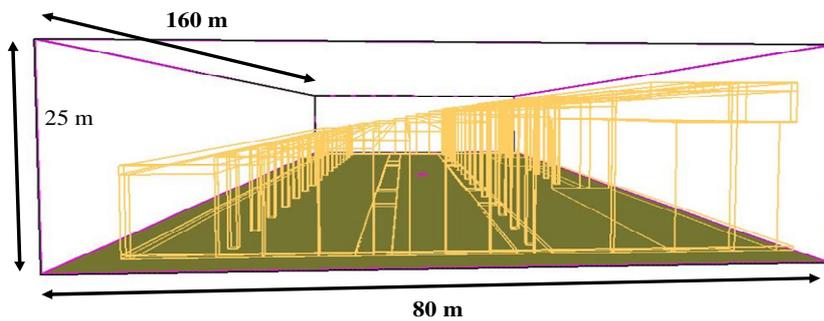


圖 8-1 輸入參數及建築外型等尺寸作為輸入檔

然後，必須定義及選取模擬之空間。當然，此空間之大小必須充分涵蓋模擬之對象範圍。同時，還要比其稍大，以便可重現其邊界之現象。



Defining the Computational Domain

© 2002/10, Dr K.H. Yang

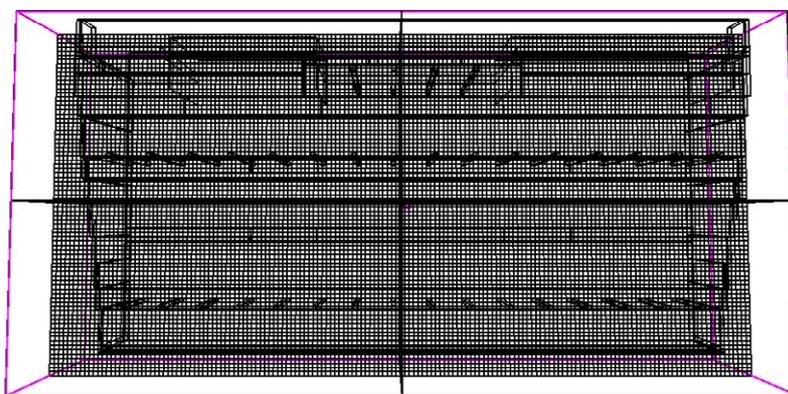
36

圖 8-2 定義計算範圍

1-3 格點分割、分析

格點若分得較細，模擬結果當然準確度較高，但也因此需較長之運算時間。反之，若格點分的太大太粗糙，則精準度較差。因此，最佳之方式即為在火源附近及開口部等邊界條件附近將格點加密，兼取運算速度與精度兩相平衡。

NIST Smokeview 1.0.0



Setting the Grid Size

以 0.5m 為一格點，共 640,000 點 (80 × 160 × 50)

圖 8-3 進行格點分析並求取最佳化之格點尺寸。常見之技巧為在火源附近及開口部等邊界條件附近將格點加密，兼取運算速度與精度兩相平衡。

1-4 設計火災規模

一般常選取 NFPA 92B 所列之 t^2 火災成長曲線與相對應之應用場所。此四條曲線乃依據慢速(Slow)，中速(Medium)，快速(Fast)與急快速(Ultra-Fast)等四種不同之火災成長速率而得，且隨時間之平方成正比。其適當之應用分類可參考 NFPA 92B 原稿或上圖。圖 8-5 同時列出其火災規模成長速度之相關係數以供參考。

基本上，如燜燒或一般火載量較低之火災採慢速曲線。而如以 PE 或棉質材料製成之床墊等材料或郵件包或 3 英尺高之棧木堆等則適用於中速火災曲線。另一方面，若為 5 英尺高之棧木堆、或約 15 英尺高之堆積木箱(內含泡

棉等材料)則適用於快速火災曲線。若為三合板之衣櫃或快速燃燒中之沙發等家具，則選取極快速之火災曲線。當然，為求保守計，於設計時皆會選取較高一層之火災成長曲線；例如，台北小巨蛋當時進行煙控系統設計乃選取”快速”成長曲線，而實際以 13 個座椅依現地佈置形態所燒出來之熱釋放率曲線則呈現介於慢速與中速之間，顯示具有良好之工程安全裕度。

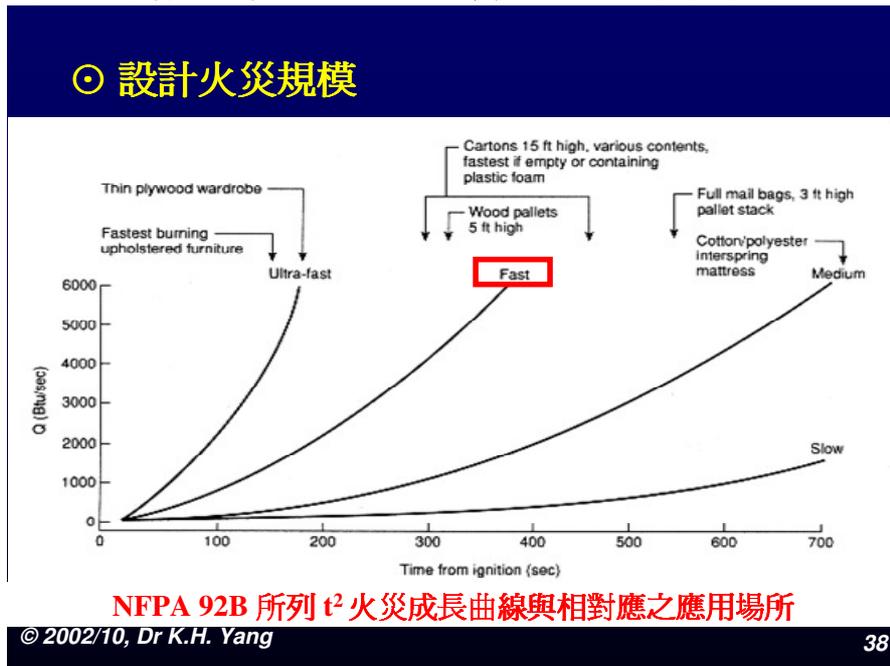
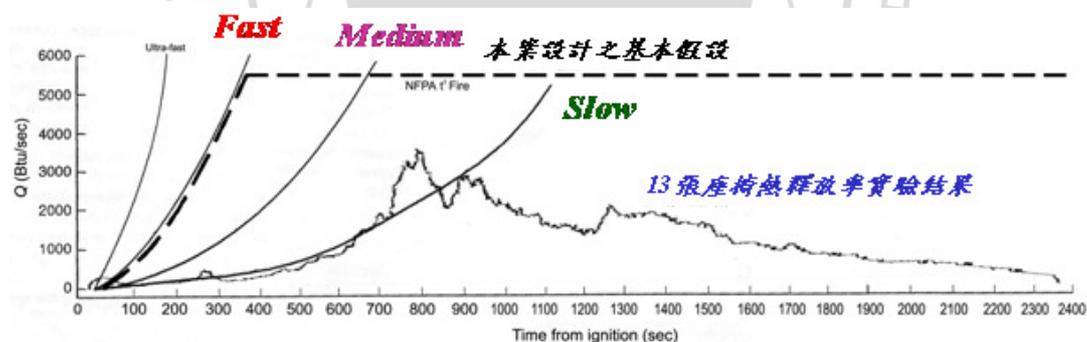


圖 8-4 性能式煙控設計常用 NFPA 92B 所列四種 t^2 火災成長曲線作為火源

Design the Fire Size			
項目	成長係數		成長時間
T-Squared Fires	(kW/s ²)	(Btu/s ²)	T _g (s)
緩慢 (Slow)	0.002931	0.002778	600
普通 (Medium)	0.01127	0.01111	300
快速 (Fast)	0.04689	0.04444	150
極快速 (Ultra Fast)	0.1878	0.1778	75

© 2002/10, Dr K.H. Yang 39

圖 8-5 NFPA 92B 所列四種 t² 火災成長曲線之成長係數表



NFPA 92B 之 t²-fire 火災成長曲線與本案 13 張座椅熱釋放率，及原設計之基本假設曲線之比對分析

圖 8-6 小巨蛋之 13 張座椅熱釋放率實驗結果顯示，其熱釋放率貼近 NFPA 92B 中之慢速與中速間。而原設計則為快速曲線，因此具有良好之工程安全預度。

1-5 邊界條件之界定

除了包含建築之開口部以外，如自然排煙口或機械排煙位置與容量，及補氣口位置等皆須一一加以定義。同時，FDS 容許擺設如熱電偶或熱輻射強度等量側用之儀器樹測點，使得電腦模擬有如進行全尺度實驗一般真實及方便。

另一方面，撒水頭及偵煙探測器等皆可以其特性一一加以輸入。簡言之，FDS 幾乎已由單純的電腦模擬進步到類似虛擬實境 (Virtual Reality) 之境界。

以下以高鐵某車站為例，加以說明。

此車站頂部開設有自然排煙口，總面積共為 379m^2 ，依此將之於 FDS 圖檔上”挖洞”即可，相當方便。

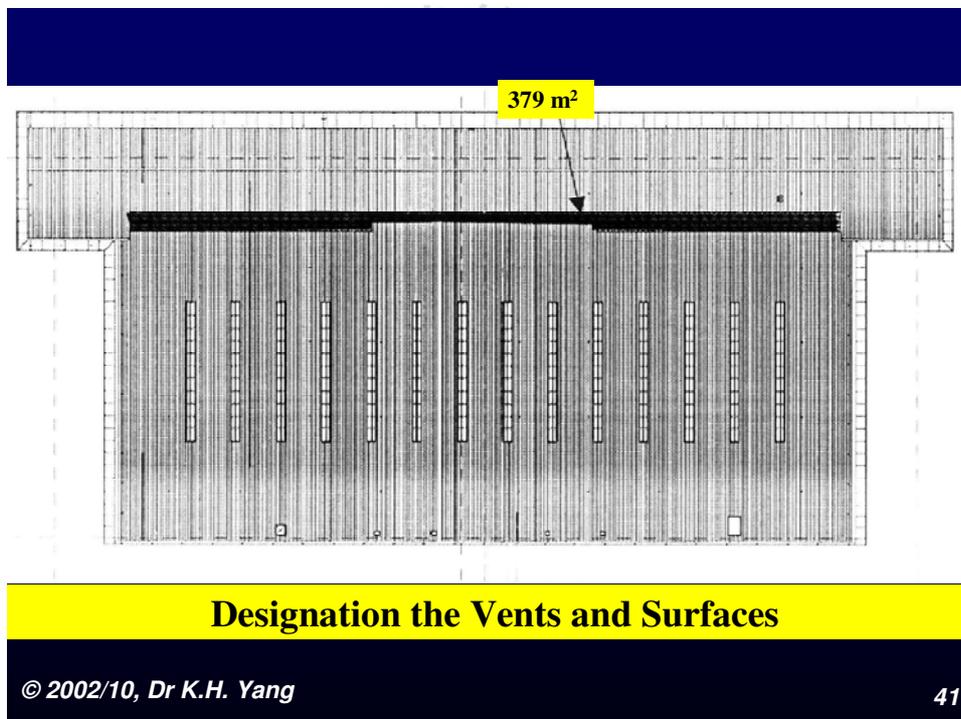


圖 8-7 輸入自然排煙口作為邊界條件之一

另一方面，補氣口位置及大小亦皆依此方式於 FDS 上形成邊界條件。

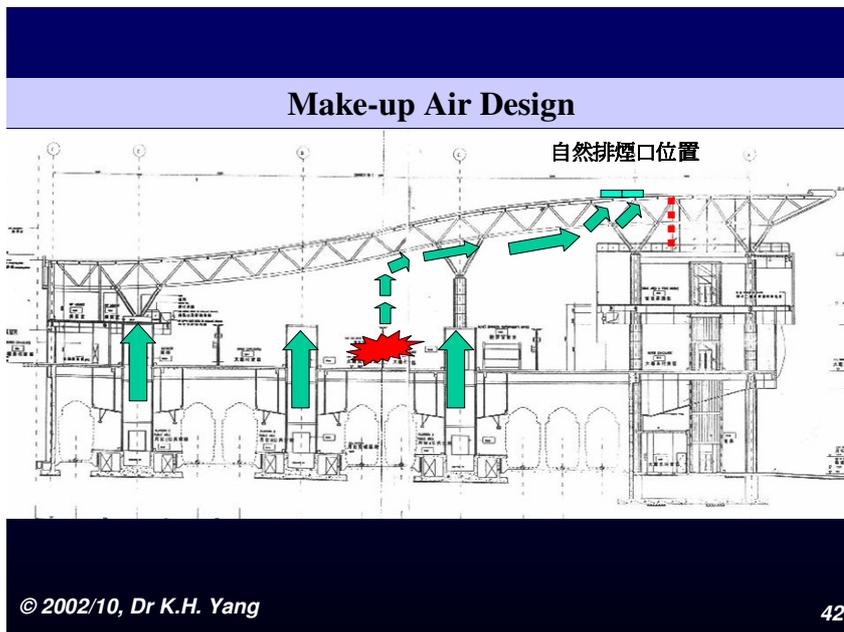


圖 8-8 輸入補氣口位置作為輸入條件之一

另外，將灑水頭依工程規範輸入，形成另一邊界條件。

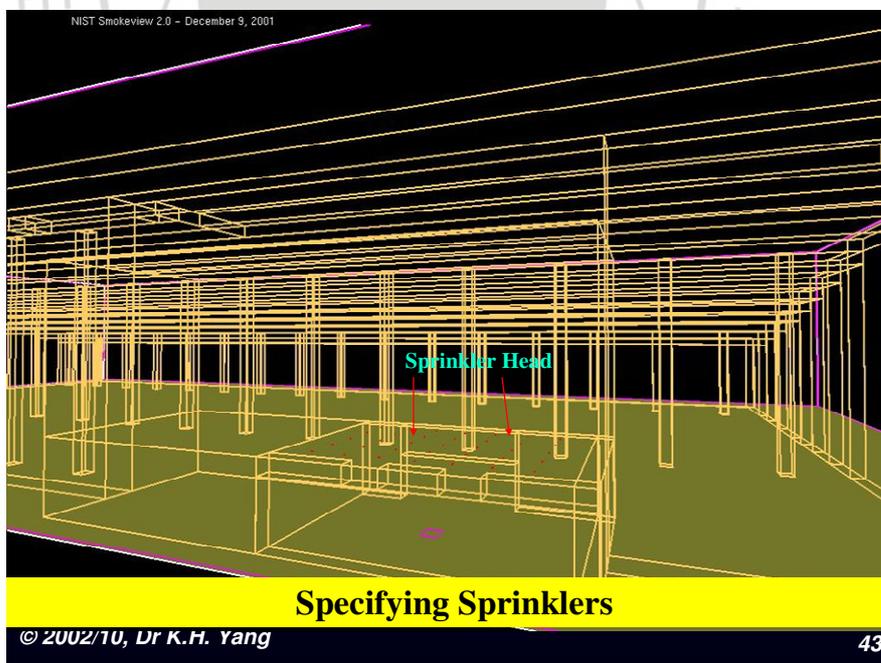


圖 8-9 輸入撒水頭之佈設做為邊界條件之一

再將熱點偶儀器樹輸入做為邊界條件之一。

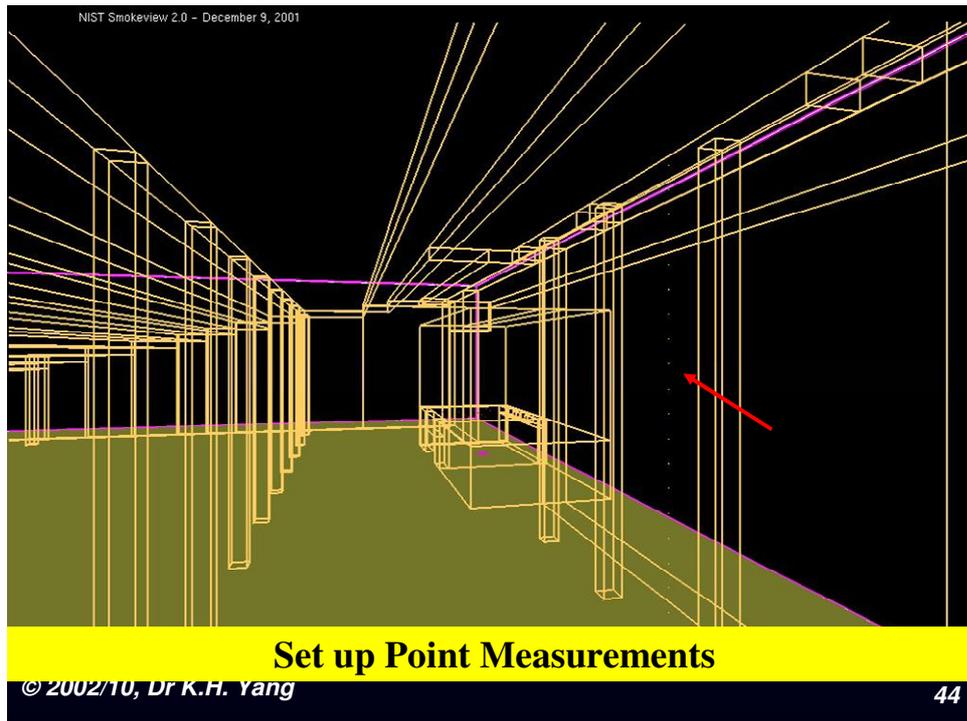


圖 8-10 輸入熱電偶儀器樹做為邊界條件之一

1-6 計算結果分析

FDS 之所以深厚國際間廣大人數之歡迎，除了運算之快速精確外，其數據後處理更是強項。經由 SmokeView 可將計算結果以動畫方式呈現，相當引人注目。以下有幾個重點為進行計算結果分析所不可忽視者，包含：

1. 熱釋放率曲線圖之判讀

熱釋放率曲線原已於輸入條件中納入，今於運算後再形輸出，可做為回饋確認之用。一般通稱為 echo-check。金以某高鐵車站為例加以說明。

運算後之熱釋放率曲線圖顯示，本例原乃依快速 t^2 成長至 5MW 作為輸入條件；經 FDS 執行實際獲得之熱釋放率曲線(Heat Release Rate)，簡稱(HRR)結果顯示，實際輸入之 HRR 曲線最高熱釋放率達 7MW，較為保守。同時，在火災發生經過 300 秒後 HRR 曲線開始有較劇烈之震動。其原因可能為格點

於火源附近加密及格點大小之選取仍未達最佳化，應進一步修正。新版之 FDS 程式已可直接指定所輸入之燃料種類，極為便利。

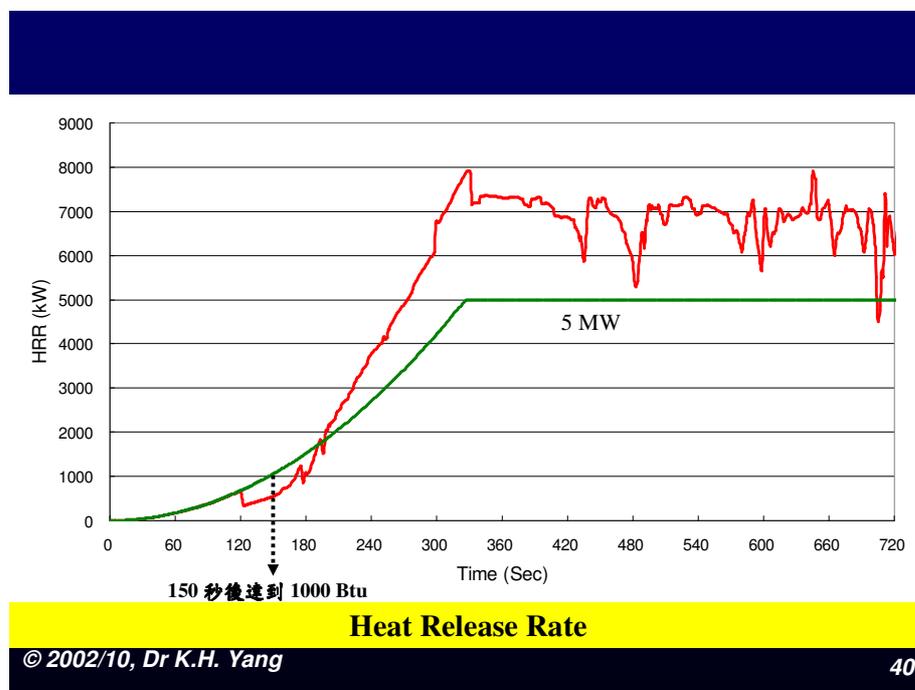


圖 8-11 熱釋放率曲線比對圖

2. 火場重要參數運算結果分析與討論

FDS 之模擬結果提供了速度場，溫度場，CO 濃度，CO₂ 濃度，煙層濃度，輻射熱強度，能見度等之分布，並以動態圖形經由 Smokeview 顯示，使得與設計目標與門檻值比對，極為方便。今進一步經由下列不同火災情境作詳細介紹。

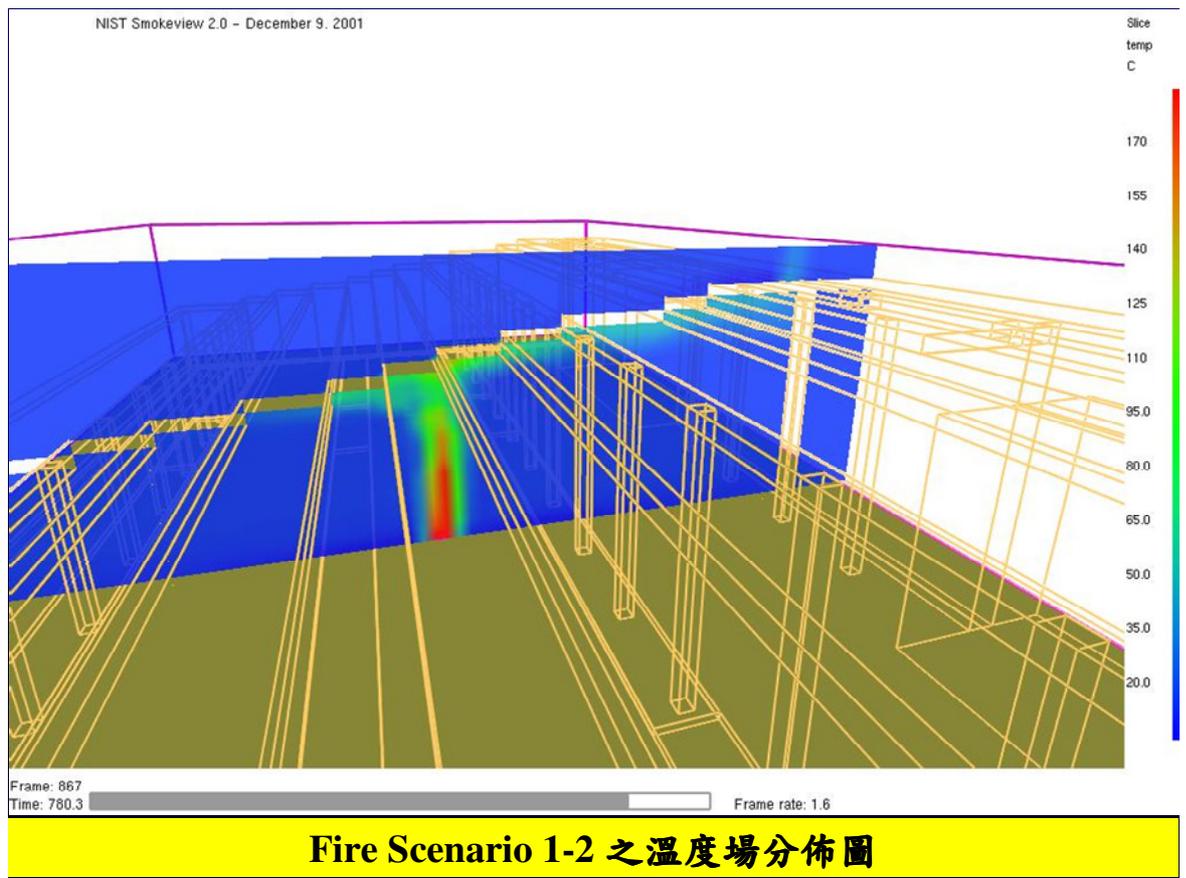


圖 8-12 典型之模擬結果溫度變化圖。右側之比例尺可調整依不同顏色顯示之溫度值，因此本圖顯示火災發生後於 780 秒時，其濃煙溫度約為 70 度 C。

3. 針對不同之火源大小、位置及數目等情境，提供完整之模擬分析及選用依據資料。

今以較完整之案例加以說明整個全貌。

以下所示為某捷運系統地下車站運用 FDS 評估於萬一發生 1.0MW(行李)火災，及 2.5MW(人為縱火)之情境下，車站內部之逃生避難動線上是否可維持良好之避難環境。

模擬結果顯示，煙層底部溫度約為 50 度 C，煙層高度約可控制於離地面 2.5 米以上。

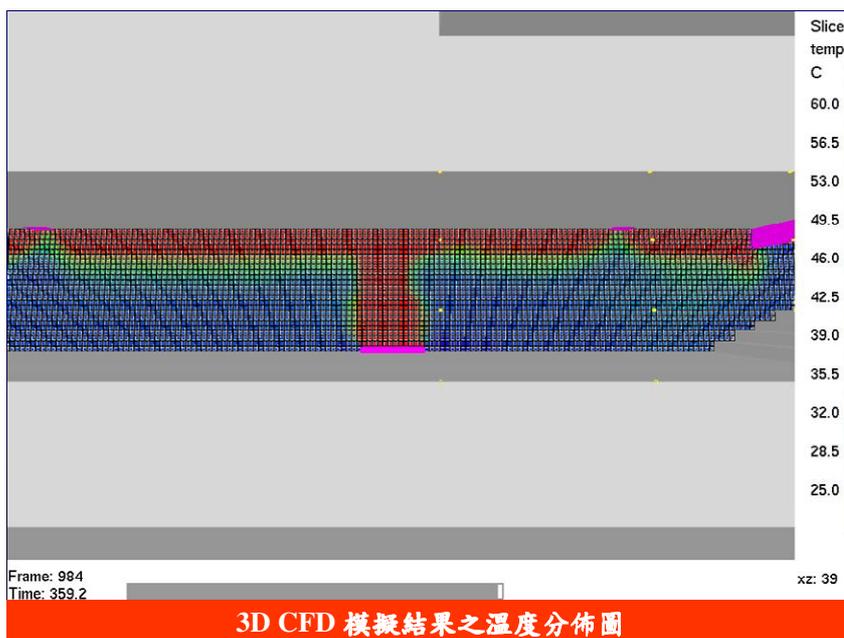


圖 8-13 3D CFD 模擬結果之溫度分佈圖

進一步之 CO 濃度分布圖顯示，除了於火源附近有較高之濃度外，其餘於避難路徑上皆很低，安全無虞。

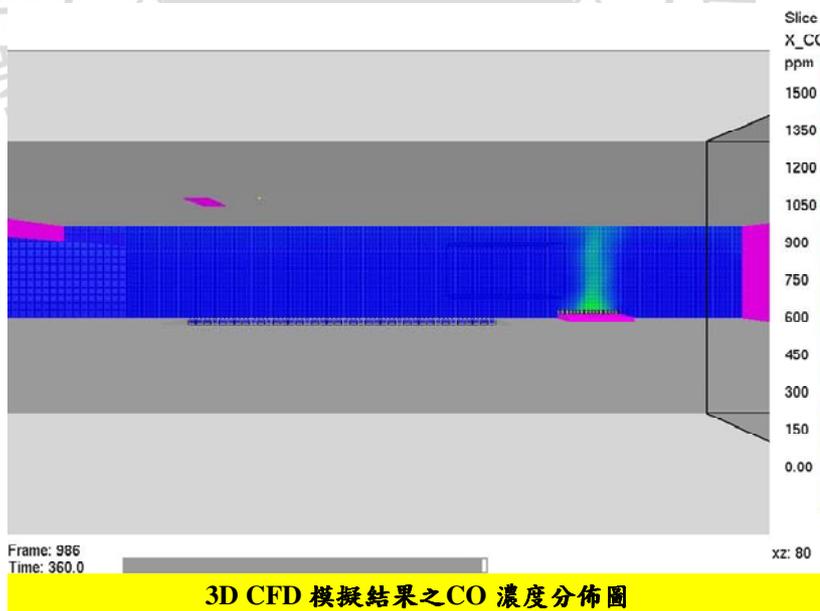


圖 8-14 3D CFD 模擬結果之 CO 濃度分布圖

此可由能見度分布進一步印證。於避難路徑上離地 2.5 米以上之高度皆可為此 10 米以上之能見度，有利避難。

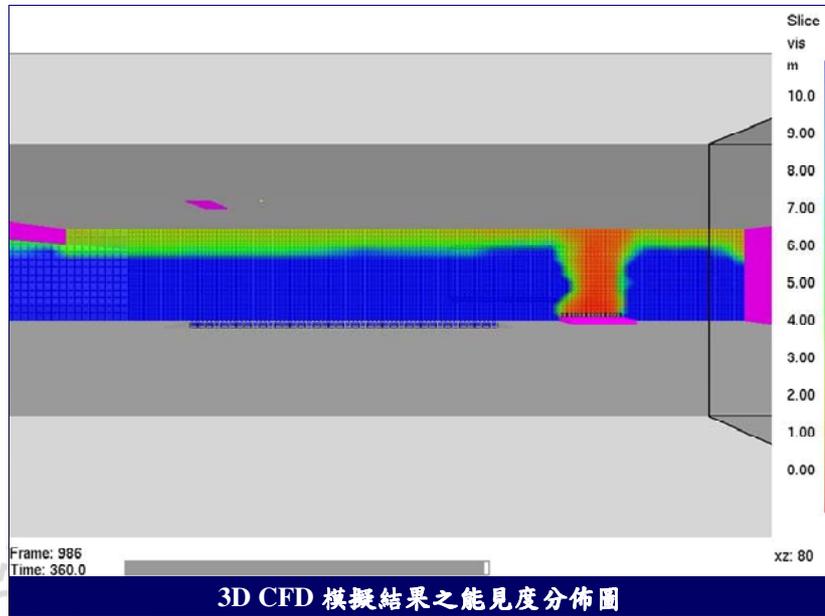


圖 8-15 3D CFD 模擬結果之能見度分布圖

熱輻射之分布圖顯示，除了於發生火災之列車底盤附近有較高之熱輻射外，於避難路徑上皆能維持小於 $6.3\text{kw}/\text{m}^2$ 之數值。避難安全可以確保。

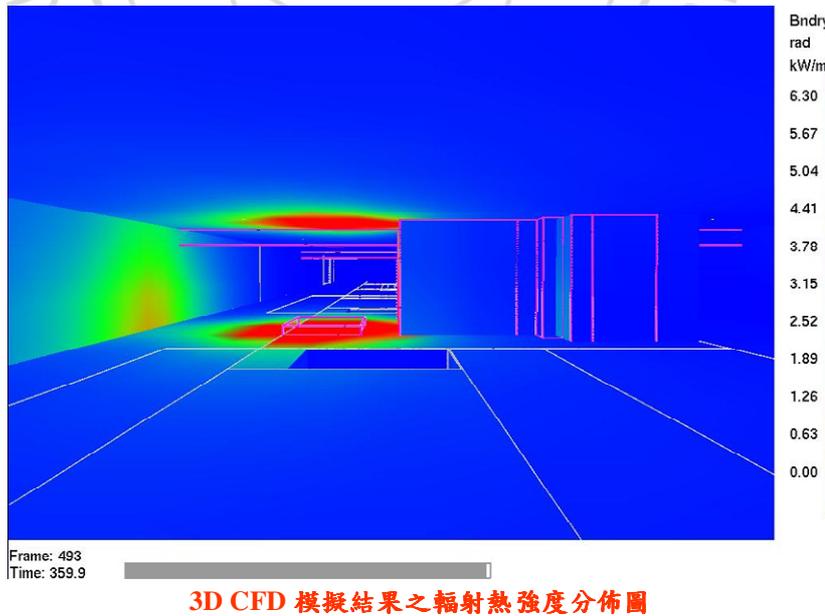


圖 8-16 3D CFD 模擬結果之輻射熱強度分布圖

將模擬結果加以完整整理，結論如下：

(1)於月台層月台層柱位 D5~D4 之間發生 1.0 MW 火災，成長速度為普通之火災情境。各項判定基準中除長向能見度分佈於火災發生 240 秒時，除二處防煙垂壁間之小區域空間，其能見度稍有影響外，火場附近之長向能見度，於淨高 1.8m 以上仍可保持於 10 m 以上之能見度。其餘如溫度、CO 濃度、能見度、與輻射熱強度等全都符合要求，皆能提供至少 360 秒之安全逃生環境。

(2)於穿堂層柱位 U3~U4 之間發生 2.5 MW 火災，成長速度為極快速之火災情境。經由模擬結果得知，各項判定基準中如溫度、CO 濃度、能見度、與輻射熱強度等全都符合要求，皆能提供至少 360 秒之安全逃生環境

(3) 於穿堂層柱位 C 附近發生 2.5 MW 火災，成長速度為極快速之火災情境。經由模擬結果得知，各項判定基準中如溫度、CO 濃度、能見度、與輻射熱強度等全都符合要求，皆能提供至少 360 秒之安全逃生環境

2.設計案例性能比對

將各種可能發生之情境，以其他案例再次進行交叉比對，佐證本設計之假設條件正確，且確屬安全無慮。今以高鐵系統某車站為例加以說明。

首先，依性能式設計之方案亦即「替代方案設計」設為 Case1，依我國條例式設計法規之方案亦即「條例式設計」設為 Case2，各執行 FDS 以確認替代方案之性能”等同或優於”條例式設計，且確實安全無慮。

2-1 火災情境之選定

本案不同火災情境分析，選擇兩種不同火災地點，進行「替代方案設計」與「條例式設計」兩者之煙控性能比對分析。有關不同火災地點之選定，以具代表性與最嚴苛火災情境（Worst Case）為原則。

今以假設火災地點，位於車站大廳主要進口之非付費區，如圖 8-17 中所示，加以說明。

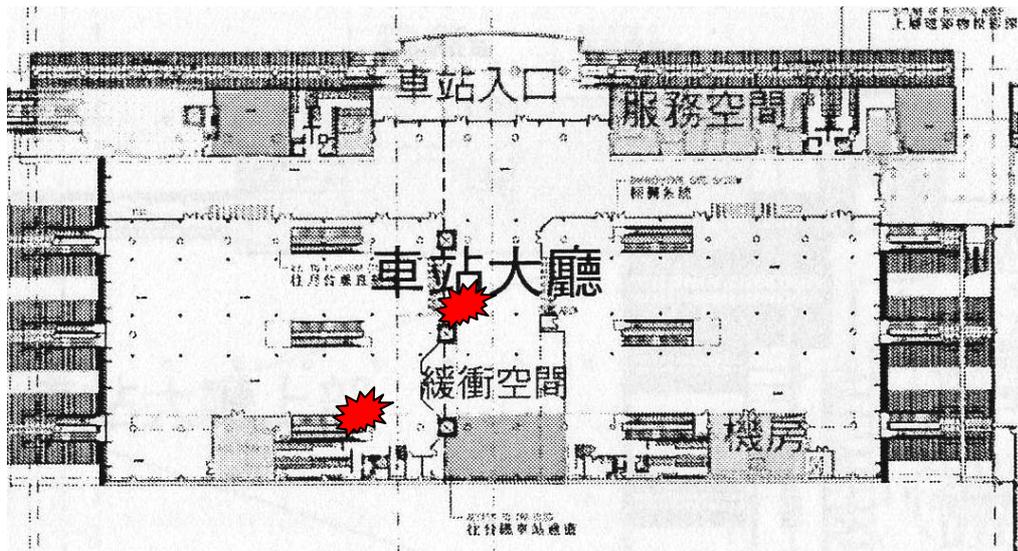


圖 8-17 兩種不同火災地點之選定建構兩種不同火災情境

於最嚴苛火災情境 (Worst Case) 之選擇原則為：

(1).對「替代方案設計」而言

因距離替代方案設計自然排煙口最遠，且其火場位置位於天花板較低處，其高度約離地 11 m，其煙層容易被冷卻而下降沈積，故可視為「替代方案設計」之最嚴格火災情境。

(2).對「條例式設計」而言

條例式設計之防煙區劃設計採每 500 m² 為一區劃，其火災地點較接近排煙口位置，故可視為「條例式設計」之最簡易火災情境。

詳細之「條例式設計」與「替代方案設計」之模擬輸入條件，如下表 5-1 所列：

表 5-1 「條例式設計」與「替代方案設計」之模擬輸入條件

	「條例式設計」	「替代方案設計」
有無撒水系統	有	有
每一防煙區劃面積	500 m ²	10,300 m ²
每一防煙區劃內之自然排煙口面積	10 m ² (佔總樓地板面積 2%)	379 m ² (佔總樓地板面積 3.8%)
防煙垂壁下垂深度	50 cm	無
火災規模	5 MW	5 MW
火災成長速度	t-squared, Fast	t-squared, Fast

3. 3D CFD 模擬結果比對分析

本案首先進行當某車站大廳一樓電扶梯附近發生 5MW 火災時，其「條例式設計」與「替代方案設計」兩者之煙控性能比對分析，亦即 Case 1 與 Case 2 之結果比對分析。

以下將比對分析 Case 1 與 Case 2 每 60 秒之不同火場性質，如溫度分佈、CO 濃度分佈、能見度分佈、煙層分佈等，藉以判定「替代方案設計」之煙控系統性能，是否合乎人員避難安全需求。

圖 8-18 為 Case 1 與 Case 2 之溫度場比對分析，其結果顯示當火災發生 360 秒後，依條例式設計之方案其煙層開始較快速之下降，而替代方案設計則煙層仍維持於高層，性能明顯優於前者。



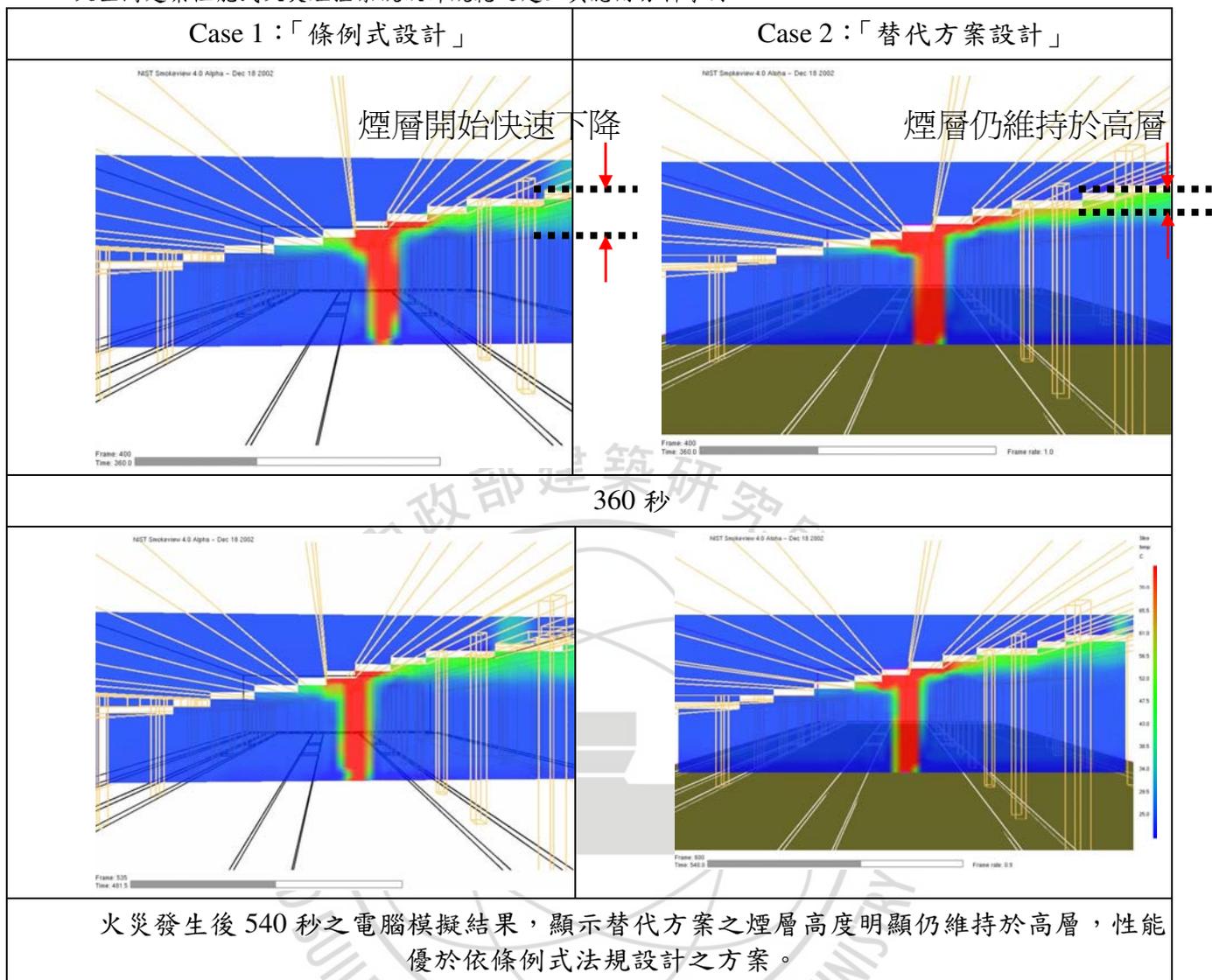


圖 8-18 Case 1 與 Case 2 之溫度場比對分析 (續)

圖 8-19 為 Case 1 與 Case 2 之 CO 濃度比對分析，其結果顯示當火災發生 540 秒後，依條例式設計之方案其 CO 濃度已偏高，而替代方案設計則 CO 濃度仍維持偏低之濃度，性能明顯優於前者。

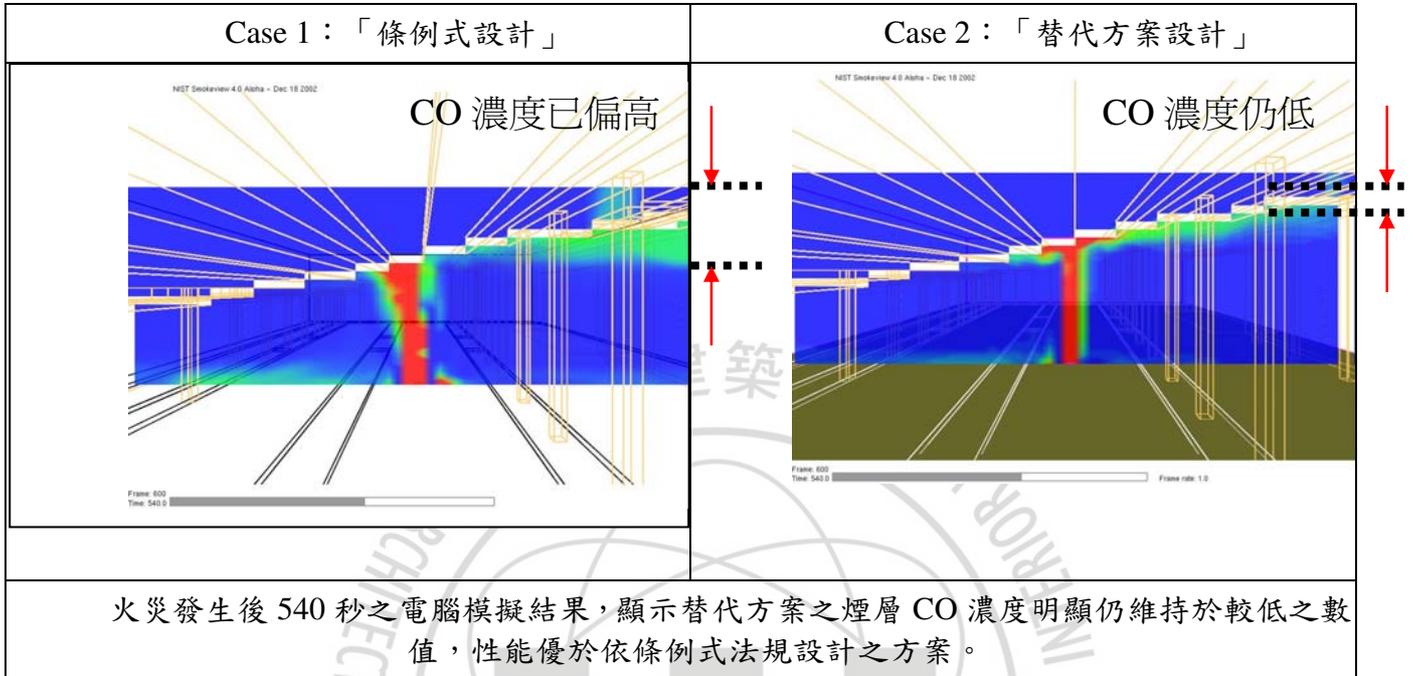


圖 8-19 Case 1 與 Case 2 之 CO 濃度場比對分析（續）

圖 8-20 為 Case 1 與 Case 2 之能見度比對分析，其結果顯示當火災發生 360 秒後，依條例式設計之方案其擴散面積開始變大，而替代方案設計則擴散面積仍維持較小之範圍，性能明顯優於前者。

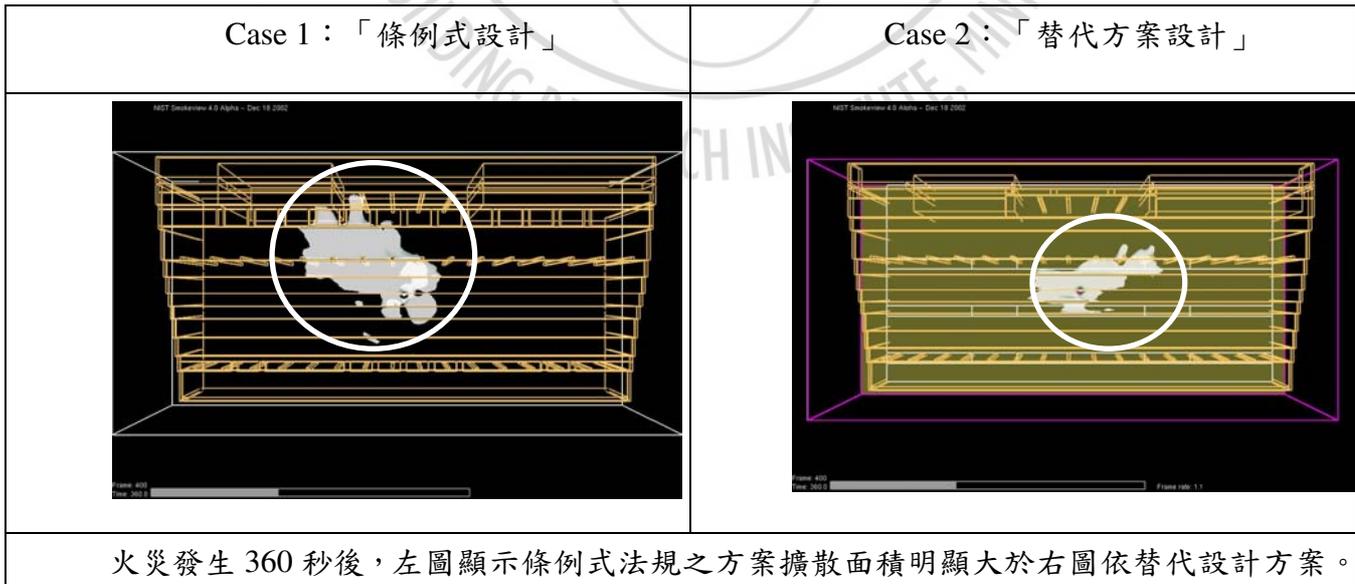


圖 8-20 Case 1 與 Case 2 之煙層擴散比對分析（續）

圖 8-21 為 Case 1 與 Case 2 之能見度比對分析，其結果顯示當火災發生 360 秒後，依條例式設計之方案其能見度開始變差，而替代方案設計則煙層仍維持良好之可見度，性能明顯優於前者。

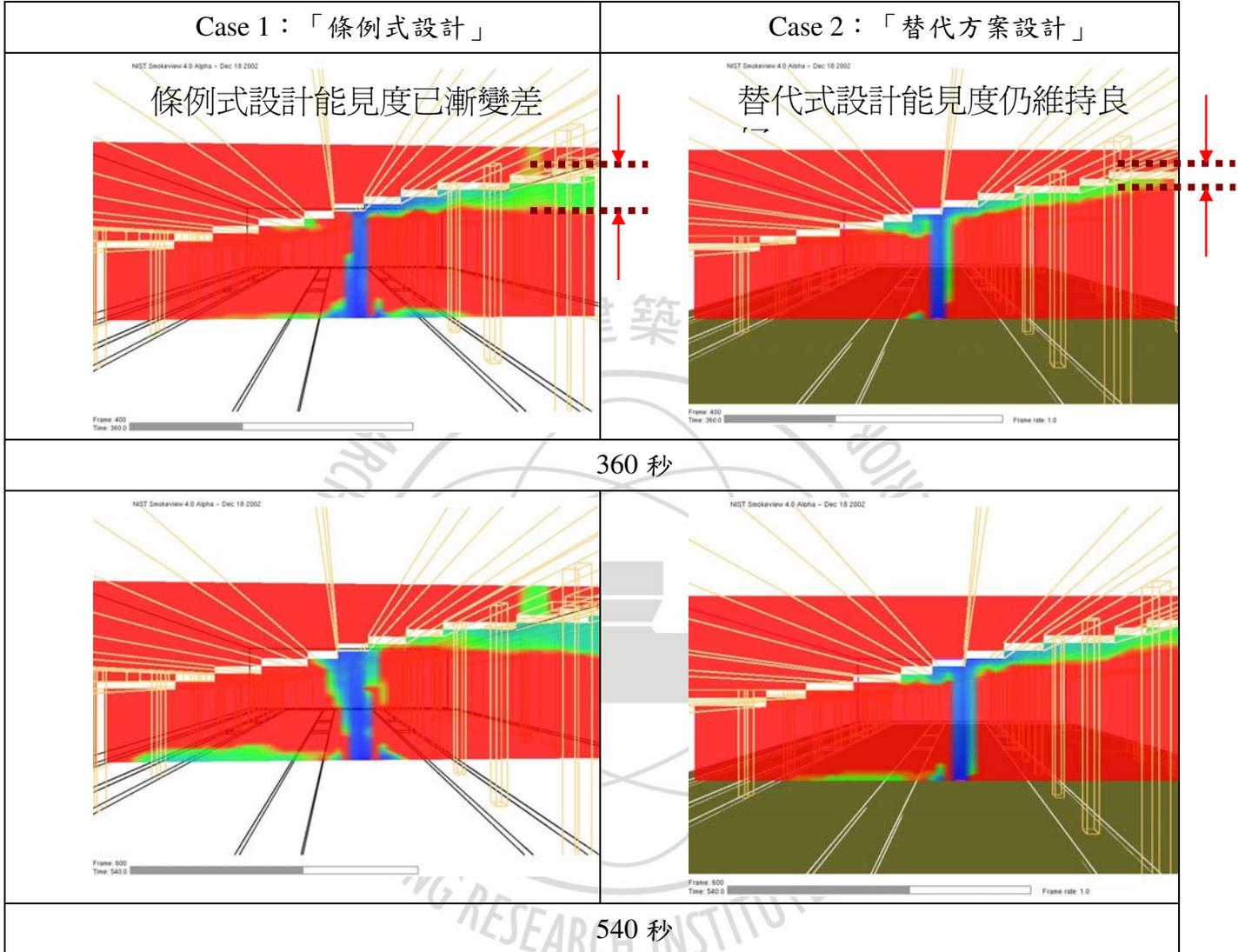
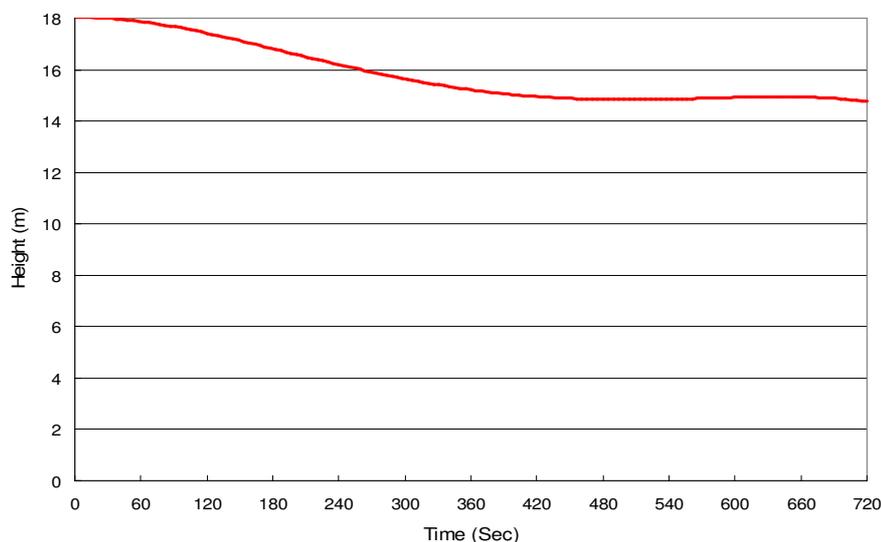


圖 8-21 Case 1 與 Case 2 之能見度比對分析 (續)

3-1 Case 1 與 Case 2 之比對分析小結

根據上述所列之 3D CFD 電腦模擬結果比對分析結果，由溫度分佈、CO 濃度分佈、能見度分佈、煙層分佈等，Case 2 之「替代方案設計」煙控系統性能，皆優於 Case 1 之「條例式設計」煙控系統性能。

其次，再根據上述所列之 3D CFD 電腦模擬結果分析，以 NFPA 92B 所建議之煙層判定條件，由兩者之煙沈積速度圖可明顯看出 Case 2 之「替代方案設計」煙控系統性能，亦優於 Case 1 之「條例式設計」煙控系統性能，可提供人員一條無煙逃生避難之安全路徑。



Fire Scenario 1-1 之煙沈積速度圖

圖 8-22 煙層高度隨時間變化之曲線圖



第九章 動態避難系統設計電腦模擬分析

1. 動態避難模擬分析簡介

目前世界上最廣為運用來模擬人員於火災發生時之逃生避難模式，是以群流理論 (Hydraulic Flow) 為基礎。傳統之避難規劃則以簡易穩態穩流模式 (Steady State-Steady Flow) 進行，人員行進間並不互相等待或超越，而以與逃生口之距離除以平均逃生速度而得。因此，形成一般設計師只檢討最遠避難距離是否小於法規之門檻值之現象。

此種簡算模式明顯不適合應用於有著大量人潮之場所。因為，即使設計之步行距離合於條式法規之規定下限值，但是否就能確保避難人員之安全，仍有進一步檢討之空間。因此，於大空間建築之避難安全設計經常須進行動態避難模擬分析 (Dynamics Egress Analysis)，以重現大量人潮相互推擠、超越與瓶頸發生等現象之真實避難行為，並提出相關建議，以提高人員逃生避難之安全性。

目前國際間廣用之動態避難模擬分析軟體為數甚多。可大分為巨觀 (Macroscopic) 及微觀 (Microscopic) 兩大模式。前者，將避難行為視為群流；而後者，則可將避難之每個人一一以個體呈現。微觀模式中，以 Building EXODUS 及 SIMULEX 兩套軟體最具特色，並獲得國際間廣泛之應用。二者之空間呈現方式皆採取細緻之網格，而對於避難人員皆可以個體呈現之，因此模擬情況相當真實。

Building EXODUS 軟體乃英國 Greenwich 大學消防安全工程系所開發完成。其模擬架構乃由避難人員 (Occupant)、人員移動方式 (Movement)、人員之反應與行為模式 (Behavior)、環境毒性對於人員避難速度之影響 (Toxicity)、災害與風險 (Hazard)、及避難之幾何空間 (Geometry) 所組成。避難人員前進之動作與行為決策皆由上述模式之互動關係所綜合決定。

其中，避難人員之特性有四大因素考量。包含，性別、年齡、靈敏度與步行速度等之相關特性以便重現年輕人較為敏捷，移動速度較快，與及老弱

婦孺移動速度較慢等現象。

人員移動方式之規劃乃是沿著連結線於節點上移動，其節點之最小間距為 0.5 m。因此，避難人員遂可依據不同之地形變化而選取不同之避難速度，包含超越等現象。

人員之反應與行為模式乃依據個人之特性與所在位置而決定，主要分為整體行為與個體行為兩種。前者為預設之整體避難策略，包含，避難人員皆先通往距離最近之出口。另亦可經由特定之設定方式而讓避難人員集中至特定之出口進行避難。因此，對於如進行避難演習等特定之逃生避難實驗亦皆可依此重現。後者則為充分考量人之局部反應。包含，對於避難行動前之反應與時間之不同，與選擇避難路徑並改變行進方向及在前方有障礙而選擇超越之方式皆可加以個別處理，甚具彈性。

環境毒性及濃煙與高溫與對於地形地物之了解程度對於人員避難速度之影響極為直接，皆在此軟體內加以重現。舉例而言，當某一大型地下車站火災發生時，若為經常藉由此車站天天通勤之上班族將可很快地找到適當出口進行避難。反之，若為初到此地之老弱婦孺，在高溫與濃煙密佈及一氧化碳濃度偏高之火場情況下，其避難速度將大為降低。此於軟體中皆已充分考量。

避難之幾何空間亦會顯出不同之避難困難程度。舉例而言，具大量人潮之捷運地下交會站，其動線複雜。若再加上如台鐵、高鐵、及捷運三鐵共構之車站如台北總站，其地下再與新光三越等地下街連通則複雜程度更是大幅提高。在此種情況下，避難速度皆會受到影響，而應真實地重現。

另一方面，SIMULEX 程式則保持上述之重點動態避難特性，但對於避難行為之呈現則採取較為簡化之方法行之，因此於國際間獲得極大之工程普遍應用性。

SIMULEX 動態避難模擬程式為英國 Edinburgh 大學所開發完成。為考慮三度空間真實的避難狀況，在逃生速度上，考量避難人員步行速度會受整體避難人員密度之影響，而使人員之避難速度改變。此程式為國際間相當具權

威性之動態避難電腦模擬程式，曾廣泛應用於國際間重大工程，例如英法海峽隧道、及各大都會區捷運系統與購物中心、台北與高雄都會區捷運系統、台灣高速鐵路各車站等，進行實際之建築物人員逃生避難性能評估。

SIMULEX 動態避難模擬程式之模擬方式，充分考量人員密度對於避難速度之影響。當人員密度低，表示人員可依較高之避難速度行進；反之，則“人擠人”之時，避難速度當然慢，相當符合實際情況。如圖 6.1-1 中所示，當避難人員之間的距離等於 0.3 公尺時，步行速度為零，亦即已產生滯留現象。若人員之間的距離大於 1.4 公尺時，避難人員以其正常無阻擋之步行速度（Free Foot Traffic Speed）前進，而且其步行速度可隨避難人員之屬性，例如性別、年齡與通勤者（適合設計地下鐵、捷運系統、高速鐵路各車站等類型建築採用）、購物者（適合大型購物中心採用）、學生（適合學校建築採用）、或一般民眾（不諳建築地形者），等等因素而改變。

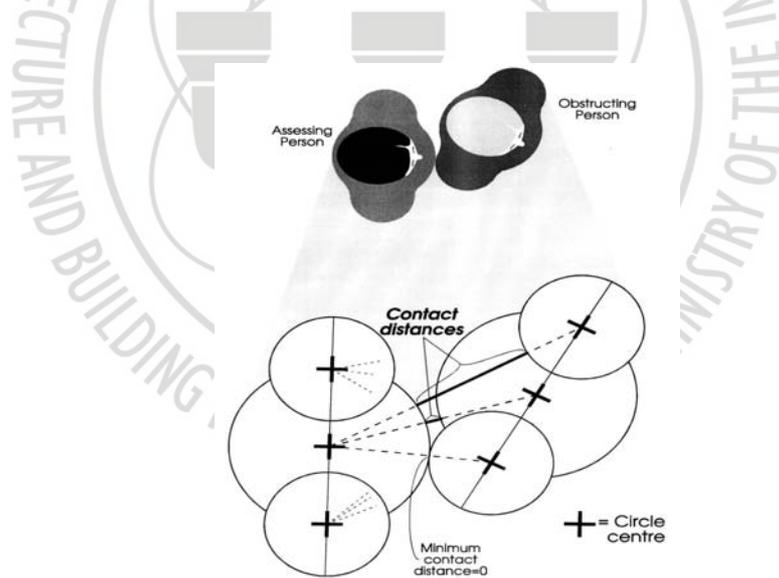


圖 9-1 SIMULEX 模擬之人員平面圖

另外，SIMULEX 程式亦考慮上下樓梯較慢之步行速度。上樓步行速度為正常水平步行之 35%，下樓步行速度為正常水平步行之 50%。再者，為能描述實際的避難過程而提供人員超越之功能。如圖 9-2 與圖 9-3 為 SIMULEX 可模擬不同方向阻礙下之超越路線圖，並可自動選取最適當之超越角度。

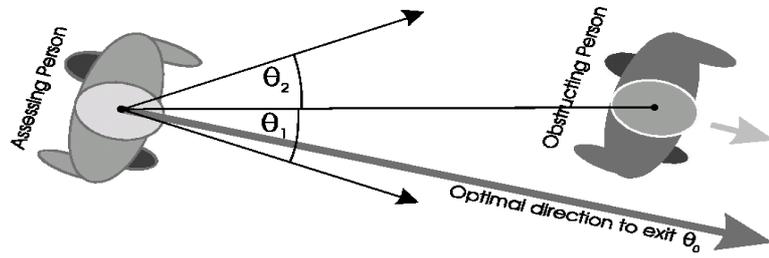


Figure 9. The Assessment of Angles for Overtaking

圖 9-2 Simulex 可自動選取避難人員超越之角度

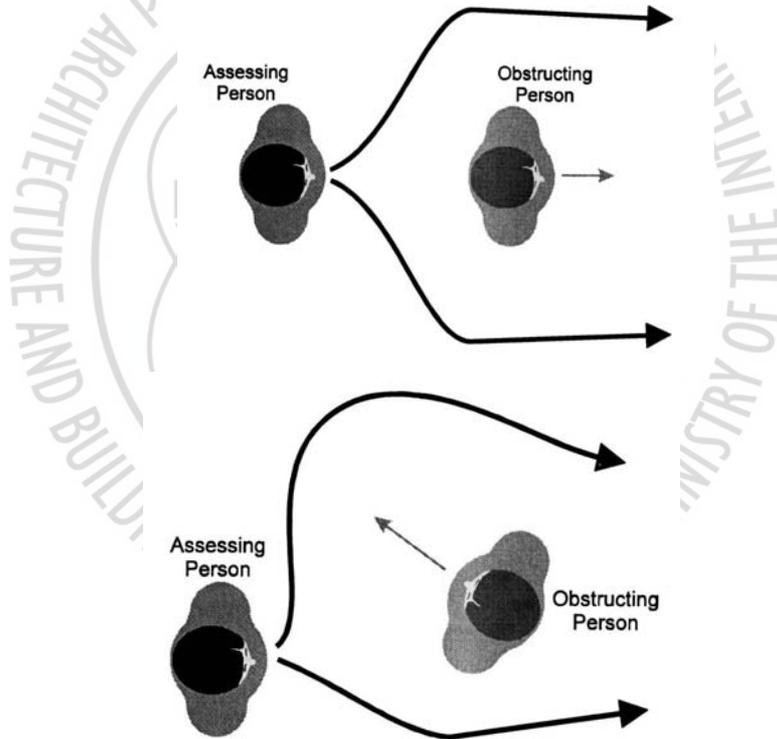


圖 9-3 SIMULEX 模擬不同方向阻礙下之超越路線圖，可充分重現人們驚慌失措往不同方向避難之特性。

2. 以 SIMULEX 進行模擬之程序

於進行一個避難性能評估案例時，相關 SIMULEX 之電腦模擬步驟，如下所列：

1. 匯入建築平面圖。SIMULEX 可直接匯入 CAD 檔案，以減少模擬圖形與實際建築圖之誤差。
2. 設定逃生出口位置及樓層之間的連接。電腦再進行距離預估（Distance Mapping）之計算。
3. 設定逃生人員位置，逃生人員的組成比例以及反應時間等逃生人員的屬性。
4. 避難模擬開始執行。
5. 存取避難模擬結果。避難過程與結果之重現（Play-back），以做為下一階段進行修改之重要參考。

2-1 案例分析

今以高鐵某車站作為案例加以詳細說明動態避難模擬輸入條件。

(1) 設計人數之假設：

2F 車站大廳人數 5,803 人，1F 月台區人數 5,358 人，共計 11,161 人。

(2) 人員性別、年齡、活動性等假設條件，如下表所示：

表 6-1 Simulax 輸入不同人員屬性時之男女老幼組成百分比

Occupant Type	% Average	% Male	% Female	% Child
Office Staff	30	40	30	0
Commuters	30	30	30	10
Shoppers	30	20	30	20
School Children	10	10	10	70
Elderly	50	20	30	0
All Male	0	100	0	0
All Female	0	0	100	0
All Children	0	0	0	100

(3) 步行速度及出口流量係數等參數的引用

如上所示，此程式會自動量取避難人群間之相對間距，而賦予不同之避難速度，如下曲線所示。

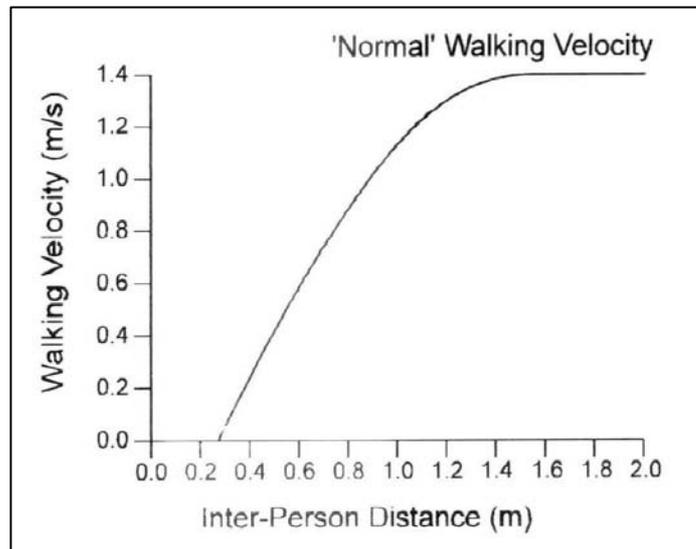


圖 9-4 步行速度與人員密度及間距之關係圖

(4) 避難路徑的選取及避難安全指標值等之描述

本項工作需依據實際現場之避難通道與避難口位置等，進行萬一火災發生時之避難路徑規劃。傳統之設計，一般皆忽視此點，而採取萬一發生火災時，所有人群皆”平均的”朝各出口同時避難之方式認定。此種過分簡化之方式，除了失真以外，彷彿避難指標系統也成為聊備一格了。

我國台北都會區捷運系統台北總站，於民國 92 年期間曾針對淡水線與南港線之轉接乘進行此種系統化之動態避難分析。並依據此成果將某些逃生避難指標加以改變方向以紓解往新光三越過多之人潮，而導引至往逸仙紀念館方面空置之避難樓梯，獲得極良好之成果。

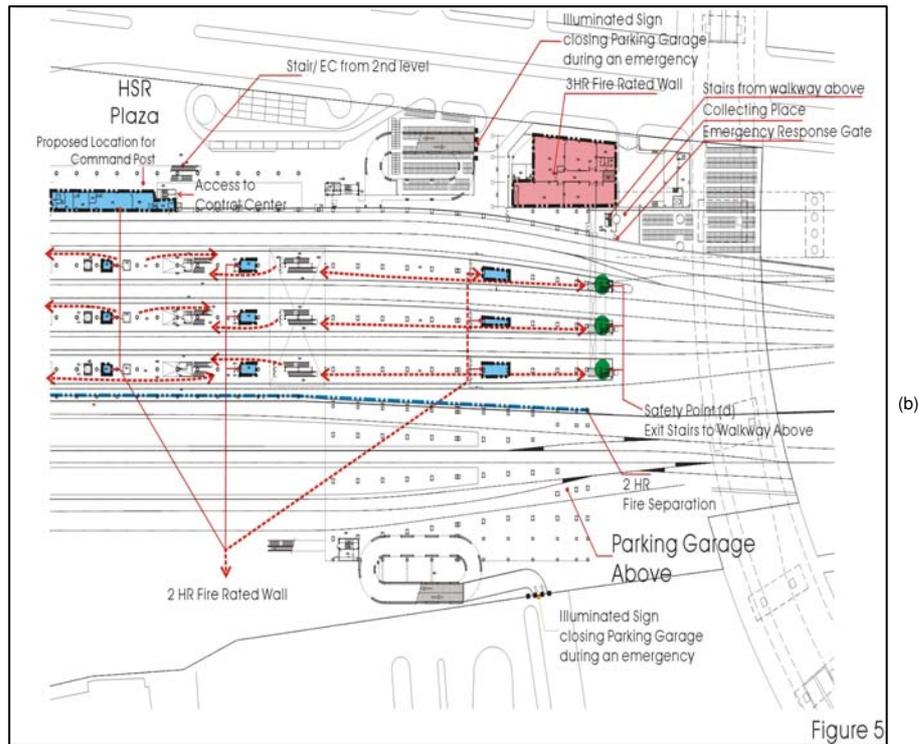


圖 9-5 某高速鐵路車站避難路經之規劃與選定(1)

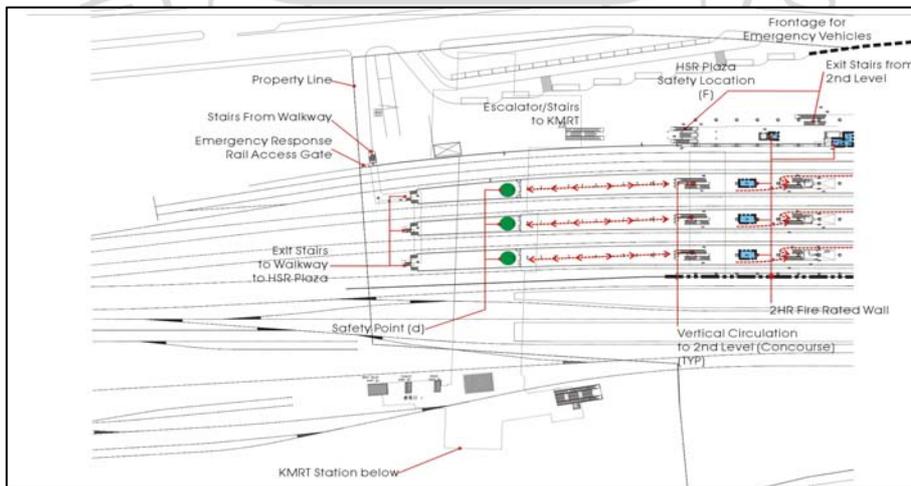


圖 9-6 某高速鐵路車站避難路經之規劃與選定(2)

2-2 動態避難模擬分析小結

利用人員動態避難模擬分析，以重現高鐵某車站之大量人潮推擠與瓶頸等現象之避難行為，可獲得較為準確之避難時間預測。此為與煙控系統維持

煙層淨高時間之重要比對基礎，其重要性不言可喻。各火災情境之動態避難模擬結果整理如下：

表 9-2 高速鐵路某車站動態避難模擬案例表

No.	火災情境	至安全點時間
Scenario 1	車站大廳 2F 北側票閘門附近發生火災，故 2F 北側付費區人員無法利用附近之出入口下樓至 1F，而須由其他緊急逃生口進行避難。	5 分 9 秒
Scenario 2	車站大廳 2F 南側票閘門附近發生火災，故 2F 南側付費區人員無法利用附近之出入口下樓至 1F，而須由其他緊急逃生口進行避難。	6 分 15 秒
Scenario 3	車站大廳 2F 南側大門附近發生火災，故 2F 南側大門無法利用，而須由其他緊急逃生口進行避難。	5 分 59 秒
Scenario 4	車站大廳 2F 北側大門附近發生火災，故 2F 北側大門無法利用，而須由其他緊急逃生口進行避難。	7 分 48 秒
Scenario 5	車站大廳 2F 下至第三月台之南側樓梯附近發生火災，人員無法利用該樓梯進行避難。	5 分 2 秒
Scenario 6	車站大廳 2F 下至第三月台之北側電扶梯附近發生火災，人員無法利用該電扶梯進行避難。	6 分 21 秒
Scenario 7	車站大廳正中央大門附近發生火災，人員無法利用該大門附近出口進行避難。	7 分 32 秒
Scenario 8	車站大廳南側大門附近發生火災，人員無法利用該大門附近出口進行避難。	7 分 37 秒
Scenario 9	車站大廳北側大門附近發生火災，人員無法利用該大門附近出口進行避難。	4 分 48 秒

3. 煙控與避難性能比對分析

以下利用所完成之高鐵某車站 3D CFD 火災煙控電腦模擬結果，與上述所選定之動態避難模擬案例結果分析，進行煙控與避難性能之比對分析。

- 火災情境描述：

假設高鐵車站大廳非付費區中央走道發生火災，任何出口皆可利用之人員避難情境。

設計人數：2F 車站大廳人數 5,803 人，1F 月台區人數 5,358 人，共計 11,161 人。

Fire Scenario 1 之動態避難模擬分析

Fire Scenario 1 模擬結果

Scenario 1 動態避難模擬情形，其結果顯示，所有人員至安全點共費 10 分 40 秒。

其人員避難至安全區之詳細人數動態統計圖，如下圖所示。

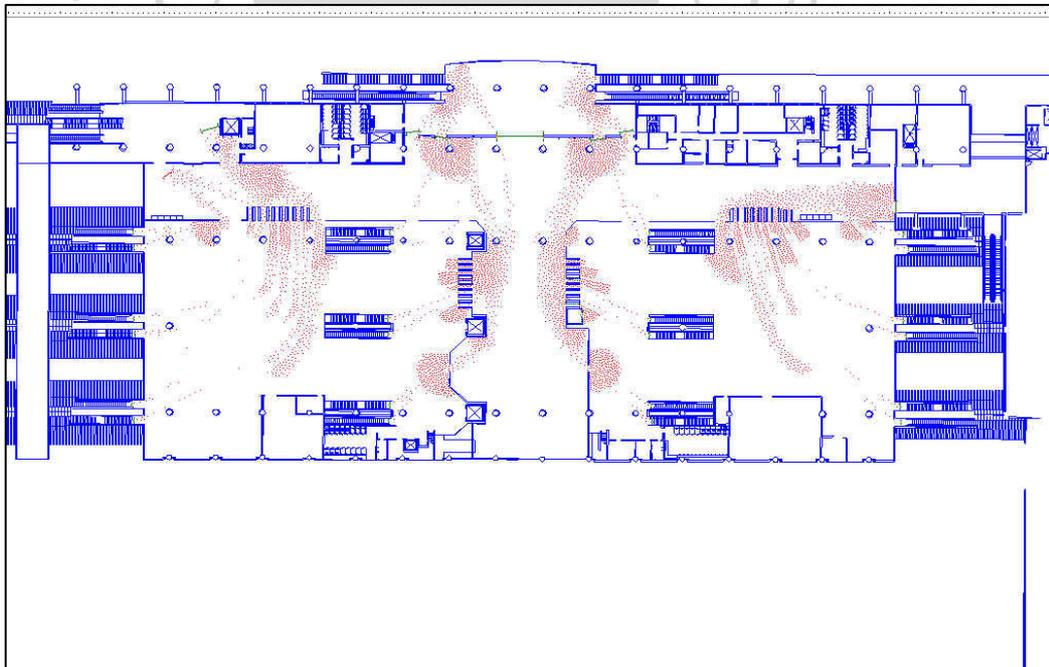


圖 9-7 高鐵某車站之動態避難模擬實況

Fire Scenario 1 抵達安全點之累計人數統計分析

Fire Scenario 1-1

- 假設高鐵左營站車站大廳非付費區中央走道發生火災規模為 5 MW

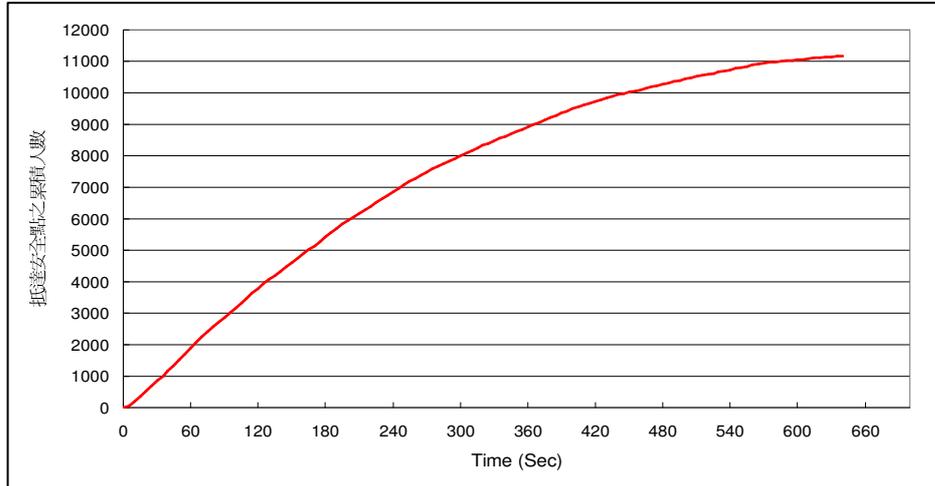


圖 9-8 人員避難至安全區之詳細人數動態統計圖

Fire Scenario 1 動態模擬結果

Scenario 1 動態避難模擬情形，其結果顯示，所有人員至安全點共費 10 分 40 秒。

其人員避難至安全區之詳細人數動態統計圖，如下圖所示。

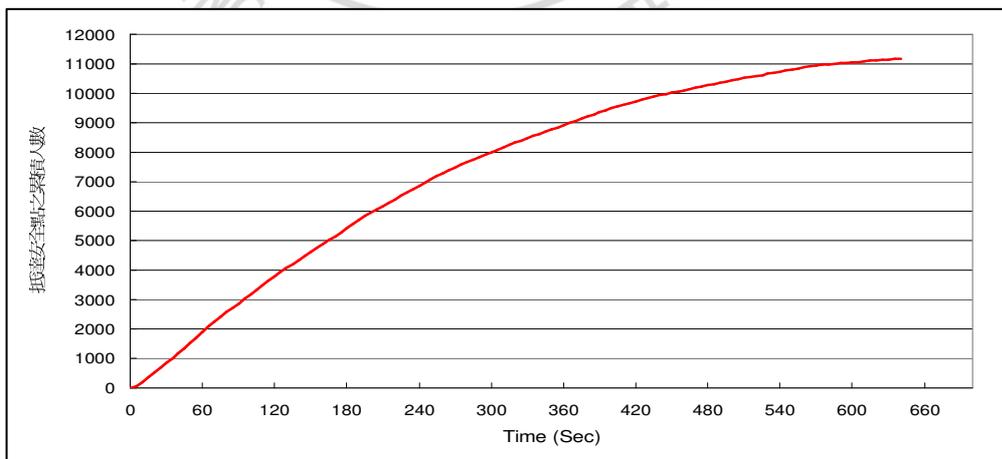


圖 9-10 Fire Scenario 1 抵達安全點之累計人數統計分析

另一方面，於 10 分 40 秒時，其煙層高度仍控制在離地 14.5 公尺以上之高層，對於避難人員提供了無煙之避難路徑與保障。

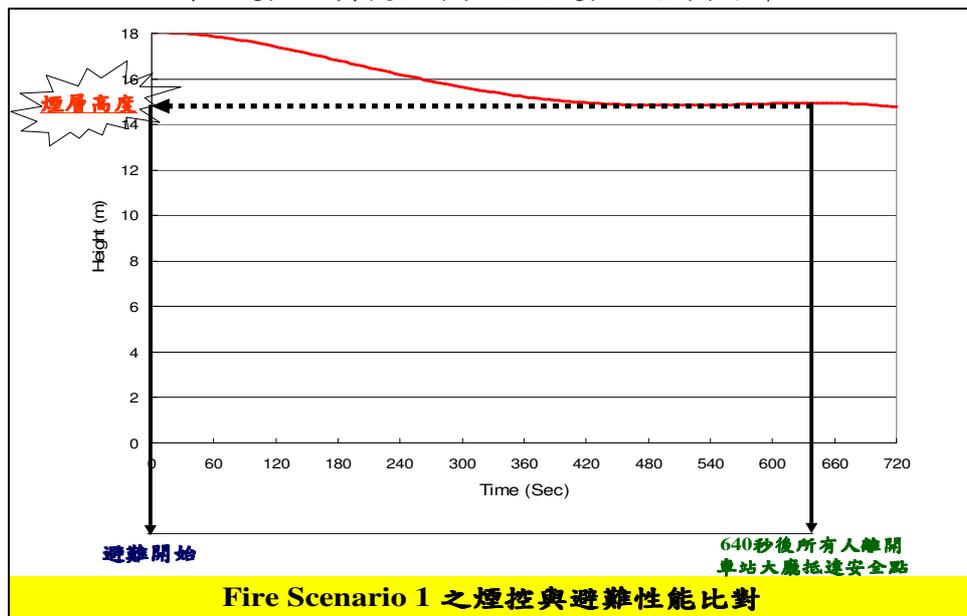


圖 9-11 Fire Scenario 1 之煙控與避難性能比對分析

4. 避難全尺度實驗印證

台北都會區捷運地下車站避難逃生計劃的基本設計依據為美國國家防火協會 NFPA 130 之相關規定，此標準廣為現行各國捷運系統避難逃生系統所引用。已涵蓋了所有緊急事件同時發生之最壞情況下，所做之逃生時間計算。

依據 NFPA 130 對於捷運地下車站避難逃生時間之安全檢測標準，為(1)當月台累積最大乘客量且發生緊急事件時，月台上所有乘客必須在 4 分鐘內自月台出口疏散完畢。(2)在前述狀況下，月台上距出口最遙遠之乘客必須在 6 分鐘內抵達地面層安全點。

為了印證台北都會區捷運地下車站，是否合乎 NFPA 130 所規定的避難逃生時間，本研究小組於 1997 年 2 月於淡水線 R14 中山站進行了 528 人之捷運地下車站避難實驗。

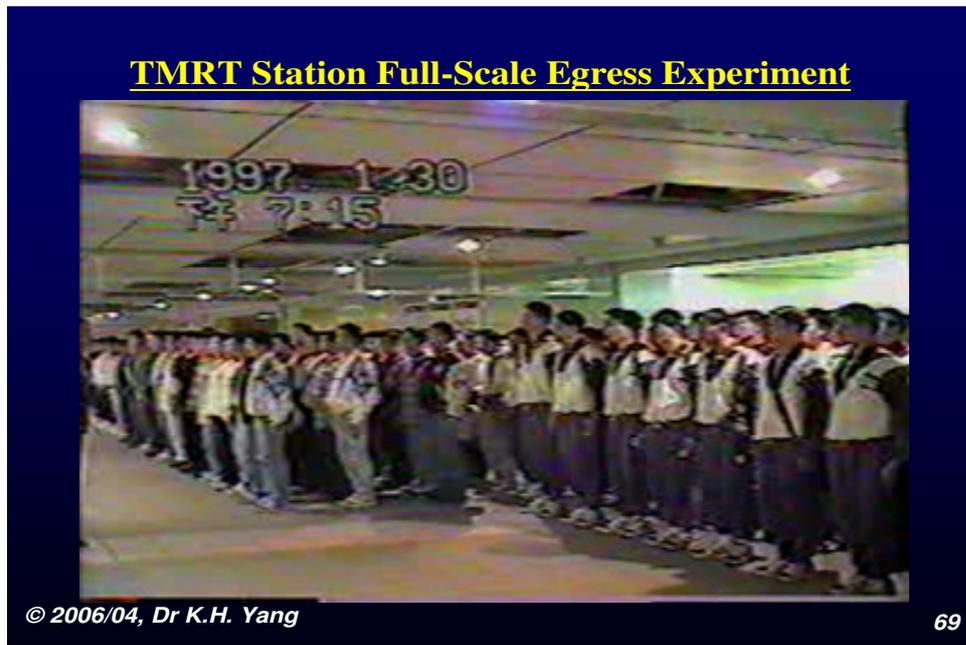


圖 9-12 淡水線 R14 中山站進行之 528 人之捷運地下車站避難實驗實況。

此避難實驗之主要目的，為觀察人群避難的狀況及可能發生的現象，並記錄於各通道出入口的滯留時間，與自月台層通過大廳層至地面層的逃生時間。而從滯留時間與逃生時間之和的總避難時間，來評估各避難路徑的安全性。

由避難實驗結果顯示，各區總避難時間符合 NFPA 130 所規定，”由月台上距出口最遙遠之乘客必須在 6 分鐘內抵達地面層安全點”。故基本上，R14 站的整體避難計劃，是一個成功的設計。

而由步行速度(V)與人員密度(D)關係圖中結果顯示，於無殘障者時，其 V-D 關係線，較有殘障者陡峭。其原因為當殘障者進入電扶梯時，其步行速度緩慢，影響了正常避難者的步行速度所致。此結果與國際間最先進之 SFPE 手冊之人流避難速度曲線比對，獲得良好之精確度。也為後續之捷運建設建立了良好的基礎。

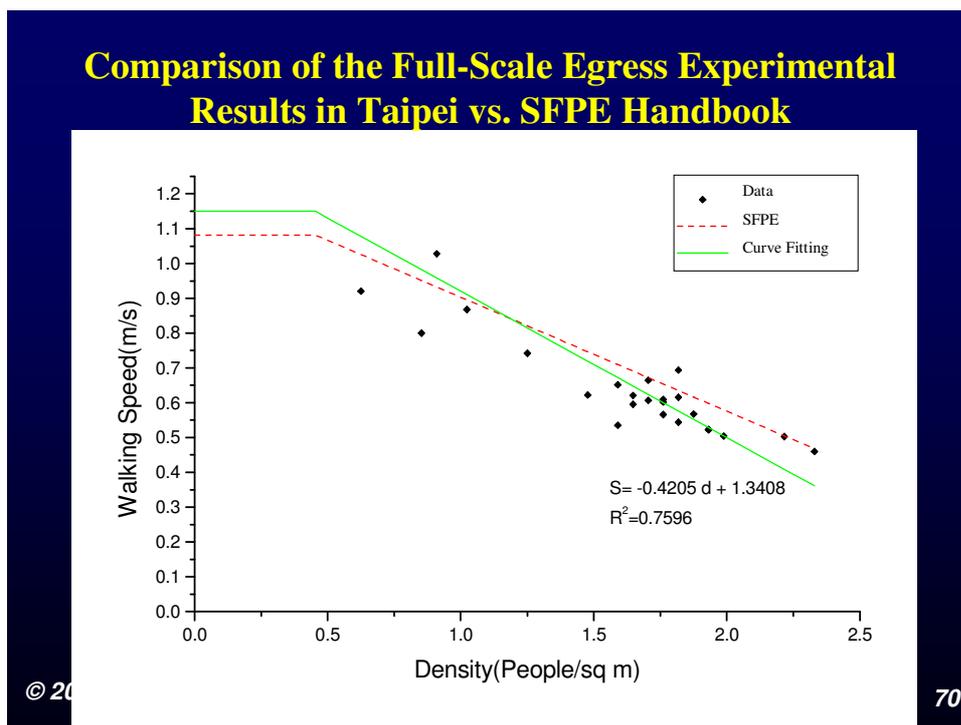


圖 9-13 台北捷運地下車站全尺度 528 人避難實驗與美國 SFPE 設計手冊比對結果相當準確，並顯示人員密度與避難步行速度呈現直接反比。此結果與 SIMULEX 所內建之避難性能曲線亦相同。



第十章 結論與建議

第一節 結 論

近年來，台灣地區陸續完工啟用許多大型/公共建築物，為講求讓使用者有明亮、舒適的感覺，常於中設計具備中庭或挑高與開闊空間。而於這類地方，又常是人群眾多聚集之地，故其火災緊急時之煙控性能要求便為非常重要。

目前我國現行消防法規中，有關煙控系統部分，僅見於「各類場所消防安全設備設置標準」第 189 條中有相關規定。於條文中規定防煙區劃面積大小、防煙壁下垂之深度、排煙口位置與排煙量大小等等設計，此為典型條例式 (Prescription) 法規之規定。

但事實上，各類場所消防安全設備設置標準 189 條主要為適用於居室部分之煙控系統設計。對於具備中庭或挑高與開闊空間部分之購物中心、航站大廈與地下車站等建築物而言，直接套用類似之條例式法規，作為其煙控系統設計之依據並不適宜。

同時，隨著國際間性能式火災煙控系統設計理念之不斷創新，對於大空間建築物煙控系統之設計亦逐步歸納出許多重點，其中，尤以美國之 NFPA 92B 最為突出，已形成國際間最具權威性之設計規範。

眾觀大空間建築物煙控系統設計，首重自然蓄煙區之設計。當火災發生時，大空間及中庭之廣大蓄煙能力能有效減緩煙沉積速度，以提供人員避難所需之時間，極為重要，此現象以自然沉積 (Natural Filling) 最為明顯。為進一步了解其設計之方式，本文共列舉了，中正機場 2 期航廈出境大廳，台北小巨蛋，京華城購物中心，自由時報總

部大樓，及萬華車站，板橋車站與 5 個高鐵車站及台鐵新站等加以說明，顯示其具有極高之工程應用性。

然而，蓄煙空間本身之容量究竟有一限度，若其所能提供之避難時間仍顯不足，則有 2 個對策：一為設置自然煙控系統，另一則為設置機械煙控系統。

自然煙控系統為發揮其良好之性能則其所需開啟之自然排煙口面積，所在位置，皆必須經由 3D CFD 電腦模擬加以選定，以求適當；本文共舉了日本太陽城，及福岡巨蛋等有名之國外案例配合我國所進行之高鐵左營站，台鐵左營新站，台北小巨蛋等重要案例加以佐證，此種經由電腦模擬一再疊代直至產生良好之自然煙控性能之過程，遠非一般條列式法規規定所能及。自然煙控系統，之較大弱點則為自然風向之影響。若自然排煙窗打開的方向有強烈之頂風則常會造成煙層分層無法維持，而急遽下降之困境，於設計上不可不慎。然而，其最大特點為經由大空間蓄煙加上自然排煙以獲得良好之控制煙層高度，耗費之動力極小，系統穩定度相當高，因此又通稱為自然式系統設計 (Passive System Design)。

反之，機械煙控系統則提供了主動式的對策，應用強大之機械通風機與風管系統強力將煙層控制在一定高度，又通稱為動力式系統設計 (Active System Design)。本文共舉出京華城購物中心，自由時報總部，台北小巨蛋等重要之國內案例加以佐證。此方面先進國家之設計規範只有 NFPA 101 6ACH (Air Change Per hour) 等較概估之指針，我國之板橋新站，高鐵與台鐵之轉乘大廳即依此原則進行設計，並經全尺度實驗印證，性能良好。而且，當排煙量至 6 ACH 降至 5 ACH 時，煙層已進一步下降，但仍然足夠提供避難所需之時間；直到降至 4 ACH

時，則系統已無法有效控制煙層高度，等於間接印證了此規範之精確性，極具參考價值。京華城購物中心之設計則採取 7.8 ACH，因此，估計具有 30 % 左右之工程預度；經全尺度實驗印證結果，果然性能極為良好。有趣的是，在該購物中心完工啟用後半年之時間曾遭人以攜帶汽油之方式縱火，結果所有煙控避難系統皆完全依照所設計之程序自動進行，而沒有發生任何人員之傷亡。此相當於上帝親自做的實驗，更充分印證了以 3D CFD 作為性能式煙控系統設計之重要性與有效性！

煙控系統之能否正確的啟動及運行有賴於偵煙與火災探測系統之即時及良好之運作。因此，本文列舉了各類型探測器並加以分析，包含火焰探測器及離子式，光電式與偵熱式等類型，並舉自由時報總部及高雄鐵路左營站之設計實例加以說明。為進一步分析其特性並進行比對分析，本文列舉了我國首度於內政部建築研究所台南防火實驗室所進行之 5 MW 全尺度實驗加以說明，並獲得具體結論。簡言之，於大空間適合採用光電分離型及火焰型等偵煙探測器；反之，若應用需要較長時間才能反應之偵熱型探測器則顯得不合宜。近年來，結合氣體取樣技術之 VESDA 極早型偵煙系統開始風行，對於如台積電，聯電等大型無塵室有顯重要。其主因為此種 VESDA 系統於火災進行初期燻燒階段即可動作，而爭取了數分鐘之黃金時間，對於價格昂貴之製程設備保護極具貢獻，香港之赤臘角機場亦設計了此種系統。另一方面，結合影像分析進行火災辨識之智慧型火災偵測系統亦開始萌芽，對於如隧道及巨蛋球場等大空間之應用具有一定之優勢，若結合大口徑之水槍，成效可期。

在大空間煙控系統發展之歷史沿革中，補氣之設計無疑的為一不可忽視之重點。大空間煙控系統之是否良好，取決於是否能有效建立推拉式 (Push Pull) 之氣流組織，補氣之設計正好提供了此一重要機制。

本文共舉了高鐵台中站及高鐵左營站與台北小巨蛋等重要案例加以說明。尤其，小巨蛋之補氣乃利用人員之避難口至室外吸入之新鮮空氣，正好提供了逆向逃生人員之無煙的避難路徑，極具巧思。國際先進國家，近年來尚未投入大的人力與資源進行此方面研究，較具權威性之 NFPA 92B 亦只有簡短的一句話：補氣口風速須小於 1m/s 以下等較簡略之規範，顯示後續仍有極大之研究發展空間。事實上，補氣系統設計乃典型之壓力中性面分析之重點所在，可藉由 3D CFD 加以進行。日本及英美等國家則亦有利用手算公式進行著，但於中庭型狀複雜而無法形成簡易之區域模式 (Zone Model)，則有相當之誤差，不可不慎。總之，3D CFD 仍屬最佳之分析工具。

3D CFD 商用模擬軟體甚多，且大抵皆由 K-Epsilon 模式延伸而來。於國際間常見者包含：Phoenix, ThermalFlex, Star CD, Fluent，等泛用型熱流分析軟體。這些軟體要進行火場之煙控系統氣流組織分析，當然亦可；但總不如美國 NIST 所發展完成公告於世之 FDS (Fire Dynamics Simulator) 軟體來得專業化。FDS 軟體於 1998 年代開始於全世界發布試用版，亦通稱為第 0 版。本文作者躬逢其盛，首度引進作為台北小巨蛋之煙控系統設計分析軟體，經過約 8 年期間小巨蛋完工啟用，此時 FDS 已進版至第 4.0 版，而且成為國際間公認為最具公信力之火災煙控系統設計分析工具。本文對於 FDS 之使用方法進行了詳細之說明：包含數入參數及建築外形等尺寸做為輸入檔之方式，格點分析，設計之火災規模，邊界條件之界定及運算結果之分析方式做了詳細之解釋，並舉高鐵左營站做一詳細之案例介紹，應可作為設計工程師入門之良好導引。

煙控系統之設計目標為提供火災初期人員避難所需之黃金時間。因此，煙控時間與避難時間 2 者其實是互相在競賽著。若煙控所能控

制之時間仍無法滿足避難所需之時間，則只有兩個解決之方式：一為增加排煙系統之性能與容量，使煙控時間得以延長，但其代價則為龐大之設備量及建置費用，另一方面則可藉由縮短避難時間來達成，其代價則為增加樓梯個數、寬度或整體避難動線之修改等建築上之對策，此於實際工程應用上常為建築師頭痛之問題。本文對於避難模擬分析之軟體進行了詳細之介紹。目前於國際間較為著名之動態避難軟體共有兩套，一套為 Exodus，另一則為 Simulex，二者皆為英國所開發完成。本文對於此二軟體先進行簡要之比對分析，再對於 Simulex 軟體在進行更詳細之說明，包含以高鐵左營站及台北小巨蛋為實例，加以證明。事實上，Simulex 軟體之使用上相當簡潔及真實，可大量重現避難人潮之群流理論，又不失其各種避難人員之屬性與特性，為使用上相當良好之避難系統設計分析工具。

經比對分析結果證實，我國近十年來所完成之諸項大空間建築性能式煙控系統設計案例，技術水平已漸達國際水準。本文以時間為經，以設計理念為緯對於性能式煙控系統設計進行了系統化之比對分析，並結集成冊，以進行經驗之傳承；此種過程或將對我國大空間建築性能式火災煙控系統設計之應用，建立了好之基礎，並形成深遠之影響。

第二節 建議

有關建立我國之大空間建築性能式火災煙控系統設計規範方面，本研究建議可分為「立即可行建議」與「中長期建議」兩方面進行。

建議一

立即可行建議——大空間建築性能式火災煙控系統設計應用分析之推廣

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、中華民國建築學會

本研究計畫之成果將編輯成為「大空間建築性能式火災煙控系統設計規範之建立與應用分析」手冊，由內政部建築研究所加以出版。並經由財團法人台灣建築中心與中華民國建築學會等單位進行建築師、消防設備師、冷凍空調技師、電機技師等之教育訓練，以進一步推廣應用。

建議二

中長期建議——大空間建築性能式火災煙控系統設計規範之建立

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、內政部消防署

目前我國相關煙控系統之規定，僅見於「各類場所消防安全設備設置標準」，並無針對挑空中庭及大型開闊空間等建築物有專章規定。

未來針對大空間建築煙控系統設計之中長期建議，可根據本計畫完成之相關結果，建立屬於我國本土是用的大空間建築性能式火災煙控系統設計規範。如此，對於我國於大空間建築性能式火災煙控系統之設計推廣，將為良好之指引，並形成深遠之影響。





參考書目

- [1] NFPA 130, 2000, " *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System* ".
- [2] NFPA 92B, 2000, " *Guide for Smoke Management Systems in Mall, Atria, and Large Areas* ".
- [3] J.H. Klote & J.A. Milke, 2000, " *Design of smoke management systems* ", ASHRAE Inc., Atlanta.
- [4] Mott MacDonald Ltd., 2000, 「高雄都會區大眾捷運系統工程橋、紅線地鐵環境模擬 (SES) 報告」, 高雄市政府捷運工程局。
- [5] 楊冠雄, 2001, 「高雄都會區捷運系統地下車站之緊急煙控策略及避難動線分析之檢討」, 高雄市政府捷運工程局。
- [6] 楊冠雄, 2000, 「台北車站消防安全改善設計分析」, 財團法人中華顧問工程司。
- [7] 楊冠雄, 1999, 「萬板專案新萬華車站月台區與隧道區排煙系統電腦模擬分析」, 財團法人中華顧問工程司。
- [8] 楊冠雄, 1996, 「建築物防火之煙控設計分析」, 復文書局。
- [9] 楊冠雄, 2004, 「大空間建築機械煙控設計之全尺度實驗與驗證」, 內政部建築研究所專題研究計劃計劃報告。
- [10] 楊冠雄, 2003, 「大空間建築自然煙控設計之全尺度實驗與驗證」, 內政部建築研究所專題研究計劃計劃報告。
- [11] 楊冠雄, 2000, 「挑空中庭及大型開闊空間建築物煙控技術規範之研究」, 內政部建築研究所專題研究計劃報告。
- [12] 楊冠雄, 1999, 「建築物空調系統與煙控併用系統性能評估與設準則」, 內政部建築研究所專題研究計劃報告。
- [13] 楊冠雄, 1998, 「高層建築火災之壓力煙控系統分析」, 內政部建築研究所專題研究計劃報告。
- [14] 楊冠雄, 1997, 「建築物火災時煙控系統運轉策略分析」, 內政部建築研究所專題研究計劃報告。
- [15] 楊冠雄, 1996, 「建築物自然式煙控制系統之研究」, 內政部建築研究所專題研究計劃報告。
- [16] 楊冠雄, 1995, 「建築物火災時煙流動特性之研究」, 內政部建築研究所籌備處專題研究計劃報告。
- [17] Fire Dynamics Simulator (Version 3.1) – User’s Guide
- [18] User’s Guide for Smokeview (Version 3.1) – A tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data
- [19] Fire Dynamics Simulator (Version 3.1) – Technical Reference Guide