

大型建築物自然通風之分析研究

內政部建築研究所委託研究報告

103

年度

大型建築物自然通風之分析研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

大型建築物自然通風之分析研究

受委託者：社團法人中華民國風工程學會

研究主持人：方富民

研究員：黎益肇

研究助理：林庚揚 杜祥寧

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究方法.....	4
第三節 研究流程與執行進度.....	7
第二章 文獻回顧.....	11
第三章 風洞試驗.....	15
第一節 實驗設備與配置.....	15
第二節 模型試驗結果.....	23
第四章 數值模擬方法與模式驗證.....	33
第一節 FLUENT 套裝軟體說明.....	33
第二節 數值預測結果之比對與模式驗證.....	54
第三節 流場檢視與分析.....	65
第四節 室內通風分析與評估.....	80
第五章 研究成果與檢討.....	97
第一節 研究成果.....	97
第二節 問題檢討與對策.....	99
第六章 結論與建議.....	101
第一節 結論.....	101
第二節 建議.....	103

附錄一 期中會議意見回覆.....	105
附錄二 期末會議意見回覆.....	109
附錄三 專家諮詢會議意見回覆.....	115
參考書目.....	121

表次

表 4-1 單層矩形廠房模型進/出風口平均壓差係數比較表	64
表 4-2 雙層矩形廠房模型進/出風口平均壓差係數比較表	64
表 4-3 圓頂室內集會場館模型進/出風口平均壓差係數比較表	64
表 4-4 單層矩形廠房模型個案流量換氣率比較表.....	65
表 4-5 雙層矩形廠房模型個案換流量氣率比較表.....	76
表 4-6 單層廠房(無窗)室內外無溫差通風效率指標比較表	84
表 4-7 單層廠房(無窗)室內外有溫差通風效率指標比較表	85
表 4-8 單層廠房(有窗)室內外有溫差通風效率指標比較表	88
表 4-9 雙層廠房室內外無溫差通風效率指標比較表.....	90
表 4-10 雙層廠房室內外有溫差通風效率指標比較表.....	92
表 4-11 圓頂集會場館室內外無溫差通風效率指標比較表..	94
表 4-12 圓頂集會場館室內外有溫差通風效率指標比較表..	95

圖次

圖 1-1	圓頂室內集會場館說明圖.....	4
圖 1-2	雙層大型矩形廠房說明圖.....	5
圖 1-3	研究步驟流程圖.....	7
圖 1-4	研究甘特圖	9
圖 3-1	風洞系統簡圖.....	16
圖 3-2	圓頂室內集會場館模型試驗設置圖.....	16
圖 3-3	雙層矩形廠房模型試驗設置圖.....	17
圖 3-4	試驗圓形轉盤.....	17
圖 3-5	圓頂室內集會場館模型壓力管設置圖.....	17
圖 3-6	雙層矩形廠房模型壓力管設置圖.....	18
圖 3-7	圓頂室內集會場館模型出風口壓力管設置圖.....	18
圖 3-8	矩形廠房模型進風口壓力管設置圖.....	18
圖 3-9	皮托管風速計.....	19
圖 3-10	薄膜式壓力轉換器.....	19
圖 3-11	電子式壓力掃描模組.....	20
圖 3-12	壓力訊號處理系統.....	21
圖 3-13	皮托管風速計.....	21
圖 3-14	資料擷取系統.....	22
圖 3-15	單層矩形廠房模型尺寸圖.....	23
圖 3-16	雙層矩形廠房模型尺寸圖.....	24
圖 3-17	圓頂室內集會場館建築模型尺寸圖.....	25
圖 3-18	單層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=0^\circ$).....	26
圖 3-19	單層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=45^\circ$).....	26

圖 3-20	單層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=-45^\circ$)....	27
圖 3-21	雙層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=0^\circ$).....	27
圖 3-22	雙層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=45^\circ$).....	28
圖 3-23	雙層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=-45^\circ$)....	28
圖 3-24	圓頂室內集會場館頂面內風壓係數等值圖($\beta=0^\circ$)	29
圖 3-25	圓頂室內集會場館頂面內風壓係數等值圖($\beta=15^\circ$)..	30
圖 3-26	圓頂室內集會場館頂面內風壓係數等值圖($\beta=30^\circ$)..	31
圖 4-1	FLUENT 基本程序結構示意圖	35
圖 4-2	GAMBIT 操作視窗.....	40
圖 4-3	FLUENT 求解器六核心運算設定.....	41
圖 4-4	FLUENT 求解器精度設定.....	41
圖 4-5	FLUENT 求解器讀入網格資料.....	42
圖 4-6	FLUENT 求解設定視窗.....	42
圖 4-7	FLUENT 紊流模型參數設定視窗.....	43
圖 4-8	FLUENT 來流邊界值 UDF 設定視窗.....	44
圖 4-9	FLUENT 邊界值設定視窗.....	44
圖 4-10	FLUENT 來流邊界值設定視窗.....	45
圖 4-11	FLUENT 流體性質設定視窗.....	45
圖 4-12	FLUENT 計算初始值設定視窗.....	46
圖 4-13	FLUENT 計算殘值設定視窗.....	47
圖 4-14	FLUENT 計算監控視窗.....	47
圖 4-15	FLUENT 迭代計算設定視窗.....	48
圖 4-16	FLUENT 輸出資料設定視窗.....	48

圖 4-17	FLUENT UDS 方程設定視窗.....	49
圖 4-18	FLUENT 濃度擴散係數設定視窗.....	50
圖 4-19	FLUENT UDS 邊界條件設定視窗.....	50
圖 4-20	FLUENT UDS 初始值設定視窗.....	51
圖 4-21	FLUENT 能量方程設定視窗.....	51
圖 4-22	FLUENT 操作條件設定視窗.....	52
圖 4-23	FLUENT Thermal 邊界條件設定視窗.....	53
圖 4-24	FLUENT Thermal 初始值設定視窗.....	53
圖 4-25	單層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=0^\circ$)	55
圖 4-26	單層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=45^\circ$)	56
圖 4-27	單層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=-45^\circ$)	57
圖 4-28	雙層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=0^\circ$)	58
圖 4-29	雙層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=45^\circ$)	59
圖 4-30	雙層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=-45^\circ$)	60
圖 4-31	圓頂集會場館頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=0^\circ$)	61
圖 4-32	圓頂集會場館頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=15^\circ$)	62
圖 4-33	圓頂集會場館頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=30^\circ$)	63
圖 4-34	單層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與 無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$)	66
圖 4-35	單層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與 無因次水平速度等值圖($\beta=45^\circ$).....	67
圖 4-36	單層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與 無因次水平速度等值圖($\beta=-45^\circ$)	68

圖 4-37	雙層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$)	70
圖 4-38	雙層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=45^\circ$)	72
圖 4-39	雙層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=-45^\circ$)	74
圖 4-40	圓頂集會場館水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$)	77
圖 4-41	圓頂集會場館水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=15^\circ$)	78
圖 4-42	圓頂集會場館水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=30^\circ$)	79
圖 4-43	典型平均濃度隨時間衰減示意圖	81
圖 4-44	典型平均溫度隨時間衰減示意圖	81
圖 4-45	單層廠房(無窗)室內外無溫差數值模擬個案配置圖	83
圖 4-46	單層廠房(無窗)室內外有溫差數值模擬個案配置圖	85
圖 4-47	個案 1A01(無窗)配置圖	86
圖 4-48	單層廠房(有窗)室內外無溫差數值模擬個案配置圖	87
圖 4-49	雙層廠房一樓室內外無溫差數值模擬個案配置圖	89
圖 4-50	雙層廠房二樓室內外無溫差數值模擬個案配置圖	89
圖 4-51	雙層廠房室內外有溫差數值模擬個案配置圖	91
圖 4-52	圓頂集會場館數值模擬個案配置圖	93

摘要

關鍵詞：自然通風、數值模擬、風洞試驗

一、研究緣起

建築物內氣流環境與空氣品質之好壞常取決於室內之通風效果。台灣地處亞熱帶氣候區，全年有近半年的時間可以藉由自然通風的方式進行室內外空氣交換，以達到調節室內空氣溫度與品質之目的。

目前國內的大型建築物普遍地使用空調設備來調節室內空氣環境與空氣品質，但是大量的使用機械通風常造成能源過度的耗費。對巨蛋型會館而言，在非集會使用之間置期，可以無須使用機械空調設備以達節能之目的。另一方面，在大型工業廠房之規劃與設計上，也必須要有通風節能之考量。因此，為確保建築物內人員之舒適性與健康性，同時兼顧能源耗用之節省，自然通風的妥善規劃與執行實屬重要。

二、研究方法及過程

本計畫以圓頂室內集會場館與矩形廠房兩種典型之大型建築物為對象，針對建築物開口位置與大小對室內自然通風功效之影響進行探討，並分析因建築物內外部間之壓力與溫度差異對室內氣流造成影響之程度與機制，以獲得量化之整合結果，並提供相關建築通風配置規劃與設計之重要參考。

研究中之量化評估除了紊流流場外亦包括溫度場之分析，以涵蓋大型建築物中風壓通風與浮力通風兩種效應之檢討。由於以試驗的方法除了需用大量之人力與時間外尚不易全然掌握室內氣流之細部變化，為利於系統化探討與評估的進行，乃以計算流體動力學方法的應用為主。然為確立數值模擬結果正確性，另須以風洞模型試驗進行個案風場變數量測，以作為驗證之依據。

三、重要發現

本計畫預計之重要發現計有如後四項：

- 1、室內主要流束路徑之長短對通風效率優劣深具影響。一般趨勢顯示，主要流束路徑愈短，流量換氣率(ACH_R)愈高，濃度衰減率(ACH_C)愈低。

- 2、對單層矩形廠房而言，增加進、出風口面積能提昇流量換氣率，且增加進風口面積時較增加出風口面積更具功效。
- 3、在雙層矩形廠房情況中，二樓窗戶之開口面積愈大，愈有利於流量換氣率之提昇，但流量換氣率與二樓窗戶開口位置之相關性並不高。此外，二樓窗戶開口面積增加時亦對濃度衰減率有正面的貢獻。
- 4、在圓頂室內集會場館情況，當窗戶開啟面積愈大，濃度衰減率愈高。此外，因室內外溫度差距引致之浮力效應可助長室內濃度與溫度混合之效果。

四、主要建議事項

建議一：

辦理本研究成果之推廣說明會：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會、中華民國全國建築師公會、中華民國

土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會

為使本計畫之研究成果能立即為大型建築物自然通風規劃與設計之應用，可以辦理本研究成果之推廣說明會。

建議二：

增加應用數值模擬分析風工程相關研究課題：中長期建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會

除了以風洞模型試驗進行建築通風之研究外，在計算機軟/硬體大幅進步的現今，應用計算流體動力學之方法進行同樣的探討已臻成熟可行之際，本研究之執行即為一個實例。目前國際知名的大型風洞試驗室多配置有 CFD 實驗室或研究團隊，除在實驗上提供服務能量外，亦能配合數值計算以建立數值風洞的機制，在分析上達到相輔相成之功效。建議未來建研所風洞試驗室應作 CFD 實驗室或研究團隊建制之規劃並持續支持 CFD 之風工程相關研究，以更提昇其服務能力與層次。

ABSTRACT

Keywords: Natural ventilation; Numerical simulation; Wind tunnel test

I. Research Topic

Analytical Study of Natural Ventilation for Large-scale Buildings

II. Introduction

The air-stream environment and air quality in a building is highly dependent on the operation of indoors ventilation. As Taiwan is located in the subtropical zone, the method of natural ventilation can be adopted up to about six months annually to maintain the temperature and quality of indoors air at a certain level.

At present, mechanical ventilation systems are commonly used for local large-scale buildings and usually consume a great deal of electricity. For a typical dome, it is not necessary to use mechanical ventilation during the period without events. For a large factory, on the other hand, the consideration of ventilation is required at the stage of building design so as to reduce the energy cost. Therefore, to assure the human serviceability and health and to economize the electricity consumption, good planning and execution of natural ventilation is important.

III. Research method and procedure

The project proposes to take two typical large-scale buildings, dome and factory, as the cases of study. By changing the sizes and locations of the exterior and interior openings, the mechanisms of the indoor flow, driven by the pressure and temperature differences, are analyzed to provide additional insight into the planning and design of indoors ventilation for such large-scale buildings.

Besides turbulent flows, the work of study also includes the analysis of temperature fields so as to investigate the situations of both pressure ventilation and buoyancy ventilation. As the execution of experiments cannot provide sufficient information to monitor extensive detail of the indoors air stream, a computational-fluid-dynamics method is used as the major tool for the problem

analysis. To verify the validity of the numerical results, wind tunnel model experiments are performed to obtain necessary measurement data as the basis for result comparisons.

IV. Important Findings

Three important findings are stated as follows:

1. The path lengths of the major indoors air streams dominate the efficiency of natural ventilation. The tendency shows that a shorter stream path leads to a larger value of air change rate (ACH_R) and a smaller value of concentration decay rate (ACH_C).
2. In the case of 1-story rectangular factory buildings, increases of the areas of inlet and outlet openings result in an increase of the air change rate (ACH_R), in which the effect of the former is more significant than that of the latter.
3. For 2-story rectangular factory buildings, a larger opening area of windows can promote the air change rate (ACH_R). However, the arrangement of the second-floor windows has little effect on the change of ACH_R .
4. For the dome buildings, as the area of the window openings increases, the concentration decay rate (ACH_C) and temperature decay rate (ACH_T) also increase. In addition, buoyancy effect can promote indoors concentration and temperature mixing, resulting in increases of ACH_C and ACH_T .

V. Major suggestions

The major suggestions are

- to arrange a workshop to demonstrate the achievements from the present study, and
- to promote the support and funding to wind engineering projects in the field of computational fluid dynamics.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

一、緣起

隨著工業的快速發展，人們對於不可再生能源的過度耗用，使得地球的資源有造成枯竭之虞。此外，由於自然環境之破壞，近年來全球性的氣候變遷也成為人類面臨的嚴峻考驗，而節能減碳的議題已受到國際間的重視。於 1992 年聯合國氣候變化綱要公約的通過與 1997 年京都議定書之達成，使得溫室氣體減排被公認為已開發國家的義務。目前本國也積極推動節約能源政策，訂定多種建築物之節能規範，於建築技術規則中也增加了建築節能設計的相關法規。

相關研究顯示，現代人每天約有九成的時間處於室內，而室內環境品質的良好與否深切地影響了人們的日常生活甚至長期的健康問題。1982 年世界衛生組織(WHO)認定人於建築物中因不明原因導致人體產生頭暈、頭痛、疲倦、精神無法集中或黏膜刺激症狀如眼、鼻、喉感到刺激及不舒服等，且隨著待在建築物內時間的增加，不適的情形越加嚴重。反之，若於離開建築物後，身體之不適則有減輕甚而消失之跡象。行政院於 94 年通過「室內空氣品質管理推動方案」，並於 97 年通過「室內空氣品質管理法」，顯見於國內一般或公共建築物的室內環境管理中，尤其是在室內空氣品質的改善部分上已頗受重視。

就建築節能的角度而論，建築物的室內通風是一個值得探究的節能減碳議題。建築物內氣流環境與空氣品質之好壞常取決於室內之通風效果，若通風設計不適當，容易導致室內空氣品質不佳。然而，台灣許多建築物之室內空間常仰賴空調設施進行通風，但大量地使用空

調通風系統同時造成了能源的耗費。因此，為了要減少機械空調通風系統之運轉，如何藉由大氣環境中自然通風的機制以有效地節約能源實屬重要。

二、背景

室內通風可分為自然通風及機械通風兩種方式：前者係以自然的方法達到室內外空氣交換目的之過程，為一環保節能的方法，但易受自然環境因素之影響；後者亦稱為強制通風，為利用通風機械所產生之動力促使室內外空氣的交換與流動，其優點為較易控制，但常造成能源的顯著消耗。統計資料顯示，空調系統於建築物的日常耗能中占了將近五成。倘能以自然通風作充分的輔助以減少空調的使用，在節能方面應頗具成效。

台灣地處亞熱帶氣候區，四面環海，風向主要受季節、海陸風或地形風的影響，全年有近半年的時間可以藉由自然通風調節室內空氣之溫度與品質。基於節能的考量，於建築設計之初應考量如何適當利用自然通風，才能避免能源的過度耗費。而就室內空氣流動之機制而言，自然通風可概分為風壓通風及浮力通風。其中，前者源於自然風力之作用，因建築內部與外部形成的風壓差異致使空氣流動並促成通風之效果；後者係因室內空氣溫度之空間變化，因浮力效應導致空氣對流而產生之通風效應。

目前國內之大型建築物普遍地使用機械空調設備來調節室內空氣環境與空氣品質。但是大量的使用空調設備並不環保，也造成能源的耗費。以國內典型之巨蛋型會館為例，全年中無集會、活動舉辦之閒置天數常占不小的比例。若能於這段時間以自然通風維護保持室內基本空氣品質，便能達節能之目的。另一方面，在大型工業廠房通風之規劃與設計上，若能以自然通風方式輔助維持，除了可以改善室內之空氣品質外，也能符合通風節能之考量。因此，為確保建築物內人

員之舒適性與健康性，同時兼顧能源耗用之節省，自然通風的妥善規劃與執行確實是一個重要的課題。

三、計畫目的

本研究中針對之大型建築物意指建築物規模大且自然通風具顯著節能效益者，計畫中擬以圓頂室內集會場館與矩形廠房兩類典型之大型建築物為對象，針對建築物開口之位置與大小對室內自然通風功效之影響進行探討，並分析因建築物內外部間之壓力與溫度差異對室內氣流造成影響之程度與機制，以獲得量化之整合結果，進而提供相關建築通風配置規劃與設計之重要參考。

本研究的預期目標包括：

1. 建置建築物自然通風分析方法與程序。
2. 分析典型大型建築物自然通風之氣流機制，獲得規劃與設計之重要參考資料。
3. 提昇建研所在自然通風分析之能力，擴展其對工程與產業界之服務範疇。

第二節 研究方法

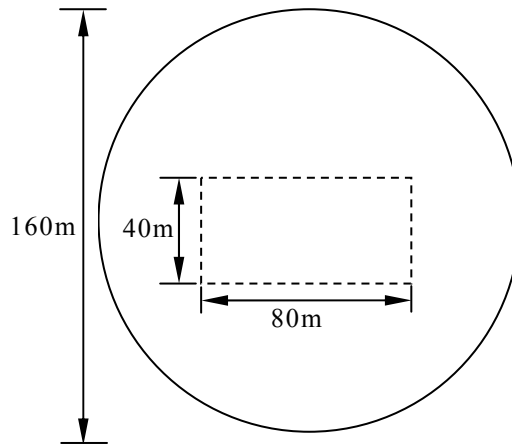
一、研究方法

本研究擬探討大型建築物使用自然通風之效益，而影響自然通風之因素頗多，包括建築物外的風速及風向、建築物的幾何外型、建築開口的位置及大小，內部樓層隔間等。研究中涉及之量化評估除了紊流流場外，亦包括相應溫度場之分析，以涵蓋大型建築物中風壓通風與浮力通風兩種效應之檢討。

二、研究內容

研究中針對圓頂室內集會場館與矩形廠房兩類典型之大型建築物，其相應之形狀與大小乃參酌國內現況擬定(詳圖 1 與圖 2)。

(a) 俯視圖



(b) 側視圖

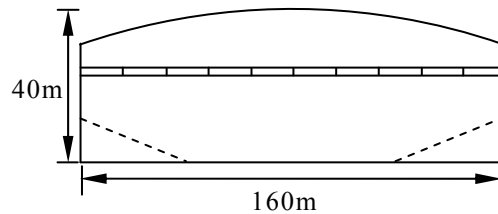
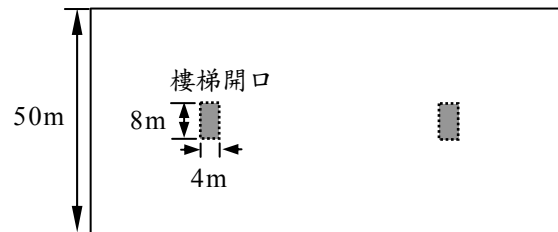


圖 1-1. 圓頂室內集會場館說明圖
資料來源：本研究整理

(a) 俯視圖



(b) 側視圖

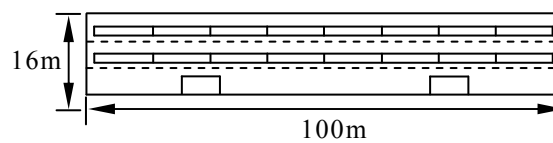


圖 1-2. 雙層大型矩形廠房說明圖

資料來源：本研究整理

本研究之內容包括如後四個範疇：

(一) 相關文獻與背景資料之收集

(二) 風洞模型試驗

於風洞中設置大型建築物(圓頂集會場館與矩形廠房)之縮尺模型，量測在不同水平風向角下模型各開口情況相應之流場變數，其結果乃作為數值模擬風場模擬驗證比對之依據。

風洞試驗個案包括：

(1) 矩形廠房(1層與2層)以及圓頂集會場館3個建築物模型。

(2) 針對各建築物模型各種開口情況進行風壓量測，獲得表面風壓(時均值與均方根值)之空間分佈結果。

(三) 數值模擬

針對矩形廠房與圓頂室內集會場館，以計算流體動力學方法進行建築物不同開口大小與位置安排下相應流場與濃度場之模擬。

數值模擬個案包括：

- (1) 來流風況：C 地況； 0° 與 $\pm 45^{\circ}$ 等 3 個水平風向角。
- (2) 大型矩形廠房(1 層與 2 層)以及圓頂集會場館 3 個情況。
- (3) 建築物內部與外部無溫度差異與有溫度差異 2 種情況。
- (4) 針對 3 個建築物情況中，模擬各種開口方式(位置與大小)相應之室內流場。

(四) 綜合分析

整合系統化的數值模擬結果，分析建築物室外風環境與室內氣流之變化，據以剖析建築物之通風效果，獲得相關建築通風配置規劃之重要參考準則。

第三節 研究流程與執行進度

本研究主要包括風洞模型試驗與數值模擬兩個部份的工作，另包含專家諮詢會議之舉行，待參酌諮詢意見後，針對計畫之執行與成果之呈現提出可能修正之建議。各階段之研究步驟分列如後(參見圖 1-3 研究步驟流程)：

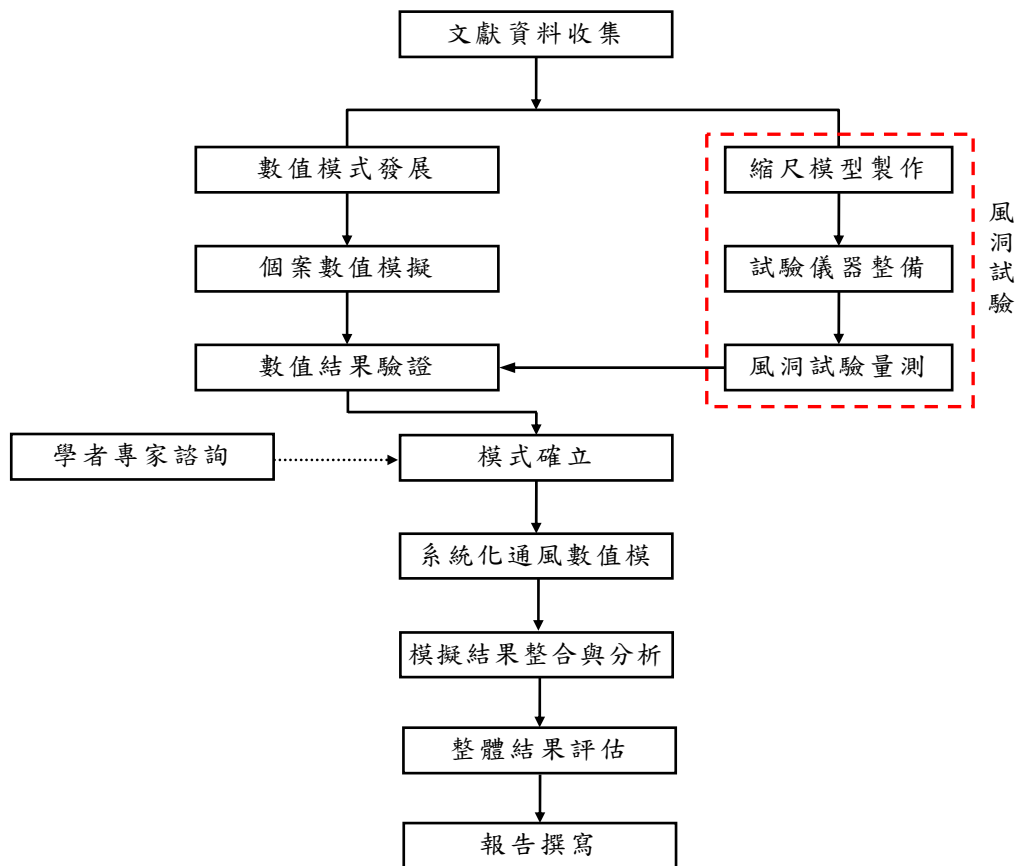


圖1-3. 研究步驟流程圖
資料來源：本研究整理

1. 風洞模型試驗：

- (1) 相關文獻與資料之收集與整理。
- (2) 縮尺模型製作。

大型建築物自然通風之分析研究

(3) 試驗儀器整備。

(4) 風洞試驗量測。

2. 數值模擬：

(1) 數值模式發展。

(2) 個案(與風洞試驗相同情況)數值模擬。

(3) 數值結果比對驗證。

(4) 模式確立。

(5) 系統化通風數值模擬。

(6) 模擬結果整合與分析。

本研究研究甘特圖詳圖 1-4。

月次 工作項目	第 1 個 月	第 2 個 月	第 3 個 月	第 4 個 月	第 5 個 月	第 6 個 月	第 7 個 月	第 8 個 月	第 9 個 月	第 10 個 月	第 11 個 月	備 註
文獻資料收集	■	■										
數值模式發展	■	■										
縮尺模型製作		■	■									
試驗儀器整備			■	■								
個案數值模擬			■	■								
風洞試驗量測與 數值結果驗證				■	■							
期中報告					■							查核點 1
專家座談						■						
通風數值模擬						■	■	■	■			
模擬結果整合							■	■	■			
系統化分析									■	■		
整體性評估										■	■	
期末報告									■	■	■	查核點 2
預定進度 (累積數)	8	20	32	43	50	58	65	73	85	93	100	%

圖 1-4. 研究甘特圖
資料來源：本研究整理

第二章 文獻回顧

有關於建築室內通風的文獻頗多，典型的研究如 Chen & Jiang[9]以實驗與計算流體動力學(computational fluid dynamics; CFD)的方法分別進行了建築物內強制通風、自然通風、混合通風和置換式通風方面的研究。Chen[10]運用雷諾應力模式與標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式模擬室內風場。江哲銘[1]指出，當室外風速超過 1.5 m/s 時，風力即可促成自然之換氣。Dascalaki 等[11]應用 COMIS(conjunction of multizone specialists)模式預測與實場量測以比較研究建築物單側通風與貫流通風的通風量。針對台灣的氣候環境，周[2]以實驗及數值解析的方法進行室內風場研究，並指出春、秋兩季為台灣適合自然通風之時期。陳[3]以風洞試驗量測並配合 CFD 數值模擬探討高架地板置換式的自然通風方式對室內氣流路徑、分佈、換氣效率及舒適度的影響。Ohba 等[12]以貫流通風模型進行風洞試驗，結果顯示室內風場會受到室外風場的影響。Haghighat 等[13]基於質量與能量守恆並融入了射流特徵方程式，發展出了一個簡化之數值模型，以預測自然通風與機械通風於一個房間中的空氣流動模式及熱分佈。Heiselberg 等[14]經由實驗量測與理論分析，探討不同類型窗戶開口對房間內的熱舒適性、氣流場特性及開口流量係數的影響。Chang 等[15]應用大渦模擬(LES)方法，針對不同的窗戶開口配置以探討換氣率及汙染物擴散情形，結果發現迎風面開口為影響空氣品質的主要因素。Allocca 等[16]利用 CFD 模式與解析法檢討使用風壓、浮力或兩者合併下的單側通風與室內條件組合的室內流況，結果認為在正確性的考量下必須同時進行室外及室內環境的風場模擬。Jiang 等[17]採用大渦流模擬(large eddy simulation; LES)預測建築物貫流通風及迎風面、背風面單側通風之氣流場，並與風洞試驗量測比對驗證，探討由風力驅動之自然通風機制。

Kurabuchi 等[18]經由風洞試驗與大渦流模擬比對研究，提出了一個局部動力相似理論。邱[4]採用標準 $k-\varepsilon$ 模式模擬建築物室內裝設通風管對自然通風之影響，結果顯示裝設通風管後可顯著提升室內換氣率。Tan 等[19]提出了一個結合 CFD 與多重區塊的模式以預測大型建築的中庭自然通風。依據實場量測結果，Mochida 等[20]證實於夏季時可透過控制窗戶開口以改善室內的熱舒適性。蘇[5]利用電腦模擬解析的方法，並透過與理論公式預測值的比較，對影響中庭浮力自然通風換氣量及中性面位置遷移的各個因素進行研究和分析。Seifert 等[21]以 CFD 分析改變風向角、氣流路徑及開口大小對貫流通風換氣率的影響。Evola 等[22]以 $k-\varepsilon$ 模式與重整化群(renormalization group; RNG) 模式探討建築風壓通風。Karava[23]等經由風洞模型試驗，針對兩相鄰牆壁窗戶開口產生之貫流通風探討建築物內部壓力及流量係數，結果顯示氣流流速會因不同的流量係數而變化。陳[6]針對單室居室之單側及相對側開口探究加裝導風板對自然通風效益之影響。Hu 等[24]以大渦流模擬方法探討紊流來流下的建築貫流通風效應，並針對來風在垂直與平行於建築開口的兩個情況，探討其對建築周遭及開口處之氣流場及開口換氣率的影響。Gao 等[25]以追蹤氣體實地量測，探討傳染性呼吸系統疾病在室內環境中的空氣傳播。陳[7]以風洞模型試驗評估風壓通風的影響參數，並探討風速、風向角、室外風場和通風開口的大小、形狀對通風量和流量係數的影響，並應用理論分析建立了一個風壓平衡模式。Chu 等[26]使用風洞縮尺模型試驗，針對兩相對面上各有一開口及兩相鄰面上各有一開口之貫流通風配置，探討紊流對貫流通風的通風量及流量係數之影響。後續朱等[8]繼運用理論分析及風洞試驗探討風壓通風的影響參數。Tung 等[27]使用追蹤氣體進行實驗量測，以檢視在空間中固定位置污染源情況下三種不同通風方案對污染氣體流擴散之情形，進而分析其換氣率及通風性能優劣。Chu

等[28]以風洞試驗探討室內隔間建築的貫流通風，指出通風量會隨著室內開口的面積增大而增大，而當迎風面與背風面開口面積相同時達到最大通風量。

第三章 風洞試驗

研究中以風洞試驗，針對三個大型建築物的縮尺模型(包括 1 個圓頂室內集會場館與 2 個矩形廠房)進行模型試驗，量測在不同水平風向角下模型各開口情況相應之流場變數，其結果係作為數值模擬風場模擬驗證比對之依據。

第一節 實驗設備與配置

一、風洞系統

風洞試驗係於內政部建築研究所風洞實驗室進行。風洞本體為一垂直向的封閉迴路系統(參見圖 3-1)，其總長度為 77.9 m，最大寬度為 9.12 m，最大高度為 15.9 m，並具有第一與第二兩個測試區(斷面分別為 4 m × 2.6 m 與 6 m × 2.6 m)。風洞中之氣流係由直接傳動軸流式風扇(直徑 4.75m，驅動馬達最大馬力為 500 kW，最高轉速為 390 rpm)驅動，正常運轉風速範圍為 2 m/s 至 35 m/s，最高風速為 39 m/s。斷面模型試驗乃於第一測試區緊鄰收縮段後進行，其風況屬低紊流強度(0.17%至 2%)且均勻(uniform)之平滑流(smooth flow)。於建築模型位置，地板面之邊界層厚度為 7 公分，來流風速為 18.9 m/s。模型試驗之阻塞比(blockage ratio)小於 2%。模型試驗相應之雷諾數($Re = UH/v$ ；U 為來流風速，H 為模型高度，v 為空氣之運動黏滯度)分別為 2.6×10^5 (圓頂室內集會場館)、 5.2×10^4 (單層矩形廠房)與 1.0×10^5 (雙層矩形廠房)。

二、建築物模型製作與架設

建築物模型係以 1/200 之縮尺以 6 mm 之壓克力板製成(如見圖 3-2 與圖 3-3)，並固定於第一測試區緊鄰收縮段後之轉盤上(參見圖 3-4)。模型頂面並分別埋設 92 個與 88 個壓力孔(如見圖 3-5 與圖 3-6)，

並經內徑 1 mm 之 PVC 管連接至壓力感應器，據以量得其表面之內風壓分佈。此外，試驗中於建築物模型之進風口與出風口處另設置了總壓力(total pressure)與靜壓力(static pressure)管，以量測進風口與出風口壓力差之時間變化 (如見圖 3-7 與圖 3-8)。

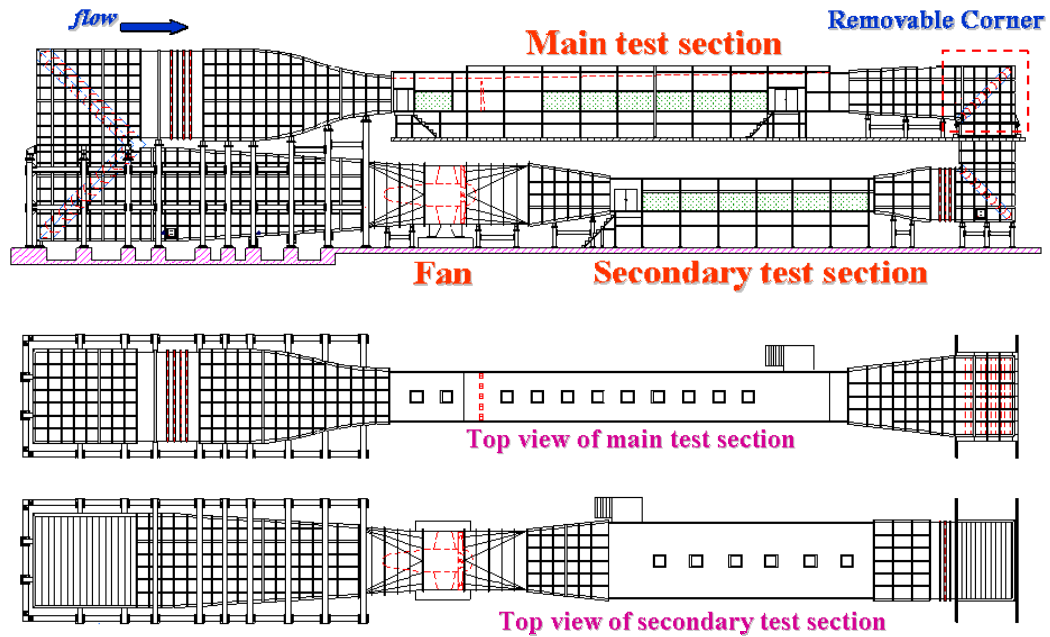


圖 3-1. 風洞系統簡圖
資料來源：本研究整理



圖 3-2. 圓頂室內集會場館模型試驗設置圖
資料來源：本研究整理



圖 3-3. 雙層矩形廠房模型試驗設置圖
資料來源：本研究整理



圖 3-4. 試驗圓形轉盤
資料來源：本研究整理



圖 3-5. 圓頂室內集會場館模型壓力管設置圖
資料來源：本研究整理

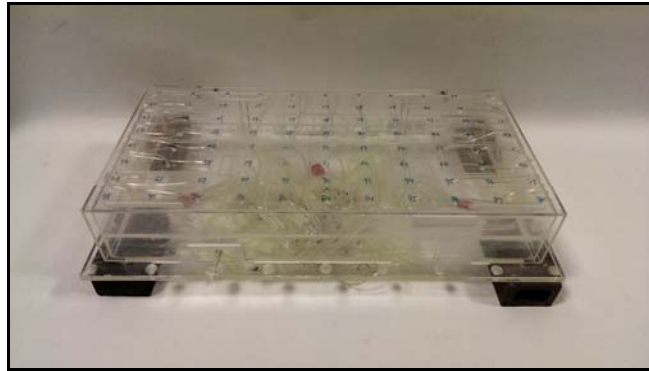


圖 3-6. 雙層矩形廠房模型壓力管設置圖
資料來源：本研究整理



圖 3-7. 圓頂室內集會場館模型出風口壓力管設置圖
資料來源：本研究整理



圖 3-8. 矩形廠房模型模型進風口壓力管設置圖
資料來源：本研究整理

三、風速量測

風洞試驗中來流風速係採用直式皮托管(圖 3-9)配合以薄膜式壓力計(圖 3-10)進行量度。由皮托管所量測到的風壓變化，經由壓力轉換器轉換為類比電壓值，再藉由類比/數位(A/D)轉換器將類比訊號轉換為數位訊號，最後經電腦讀取、記錄與分析。待量得皮托管的壓力差值(Δp)後，即代入後式計算出相應之風速(ρ 為空氣密度)。

$$U_p = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3-1)$$



圖 3-9. 皮托管風速計
資料來源：本研究整理



圖 3-10. 薄膜式壓力轉換器
資料來源：本研究整理

四、壓力與風速量測

試驗中採用電子式壓力掃描模組(Scanivalve ZOC33/64PX；參見圖 3-11)配合壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200；參見 3-12)同步量測每個壓力量測孔的瞬時壓力。壓力訊號處理系統能支援類比/數位(A/D)訊號轉換，最高可支援 8 組壓力掃描模組，解析度達 16 bits，採樣頻率為 500 Hz，每個壓力掃描模組共有 64 個壓力量測感應單元。試驗進行時係同時使用兩個壓力掃描模組(置於模型底座下方)，並將壓力管線連接至模組上的壓力輸入埠，由個人電腦透過 USB 介面控制壓力訊號處理系統擷取各模組之量測資料，其時序列資料續儲存於電腦，以做進一步的統計分析。

在建築物模型頂面之內風壓量測中，參考壓力的位置係於模型上游 1 米、風洞中心線水平側向距離 1.3 米、地板高 0.15 米處；於同位置並以皮托管量測其風速(圖 3-13)。

五、資料之處理

試驗信號經擷取系統(圖 3-14)與類比/數位(A/D)轉換後，其時序列資料續儲存於電腦，並作進一步的統計分析。

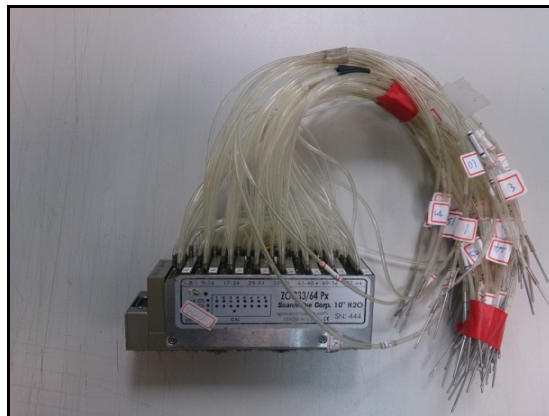


圖 3-11. 電子式壓力掃描模組
資料來源：本研究整理



圖 3-12. 壓力訊號處理系統
資料來源：本研究整理

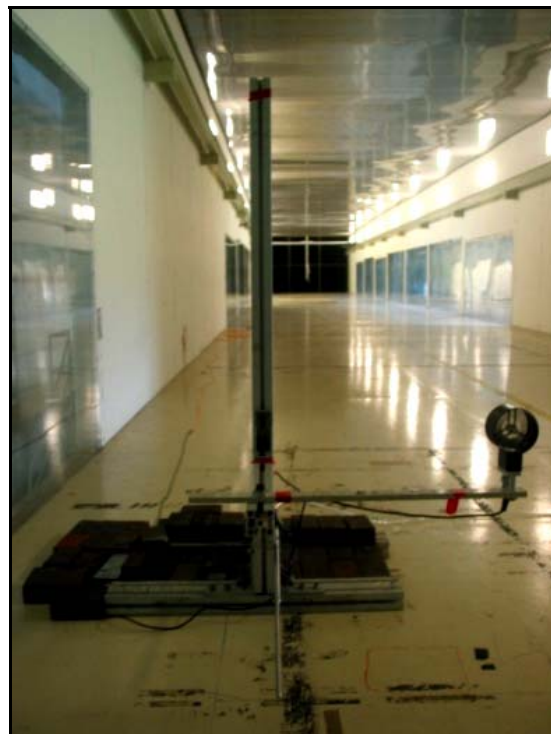


圖 3-13. 皮托管風速計
資料來源：本研究整理

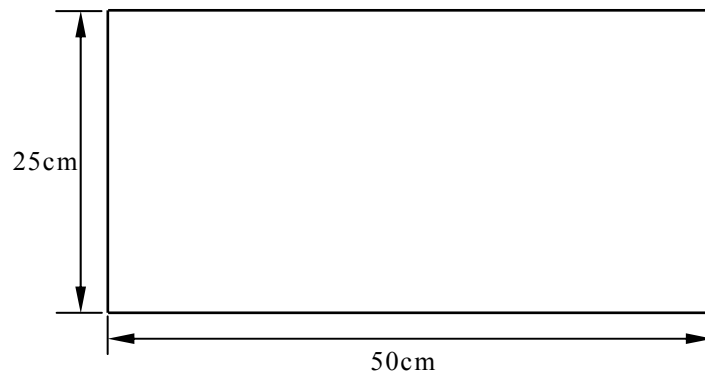


圖 3-14. 資料擷取系統
資料來源：本研究整理

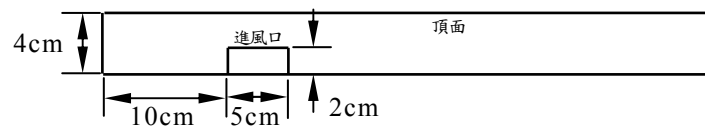
第二節 模型試驗結果

研究中之試驗量測係針對矩形廠房與圓頂室內集會場館兩類典型大型建築物之 1/200 縮尺模型(參見圖 3-15 至圖 3-17)，在均勻來流 ($U = 18.9 \text{ m/s}$)、三個水平風攻角(矩形廠房： 0° 與 $\pm 45^\circ$ ；圓頂室內集會場館： $\beta = 0^\circ$ 、 15° 與 30°)情況下針對建築物模型頂面進行內風壓量測，模型試驗之阻塞比分別約為 0.2%、0.4%(雙層矩形廠房)與 1.5%(圓頂室內集會場館)，其結果乃作為數值模擬風場模擬驗證比對之依據。

(a) 俯視圖



(b) 前視圖



(c) 後視圖

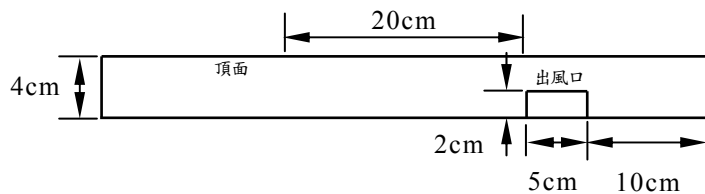
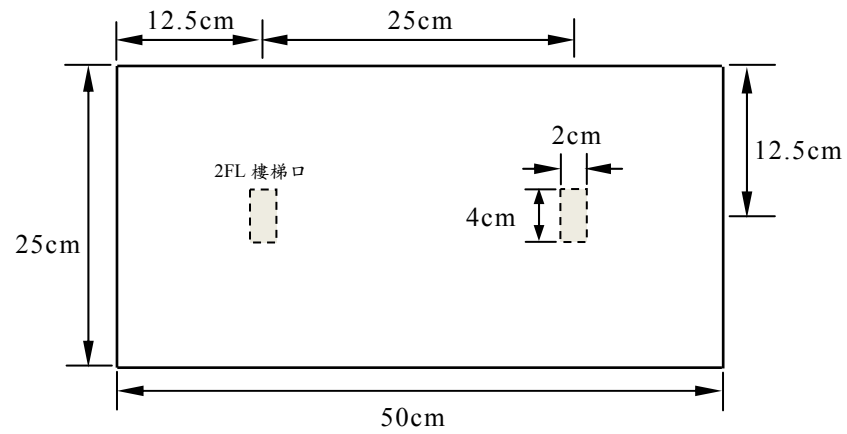
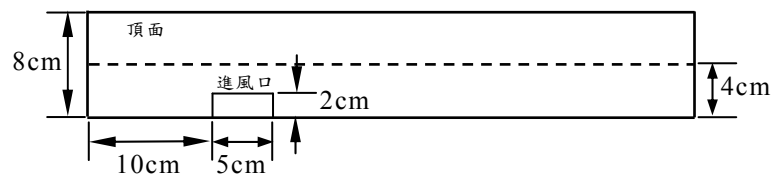


圖 3-15. 單層矩形廠房模型尺寸圖
資料來源：本研究整理

(a) 俯視圖



(b) 前視圖



(c) 後視圖

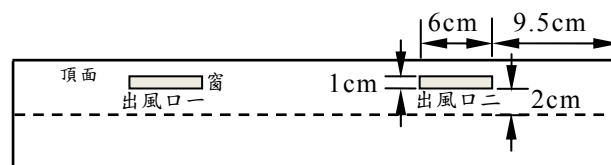
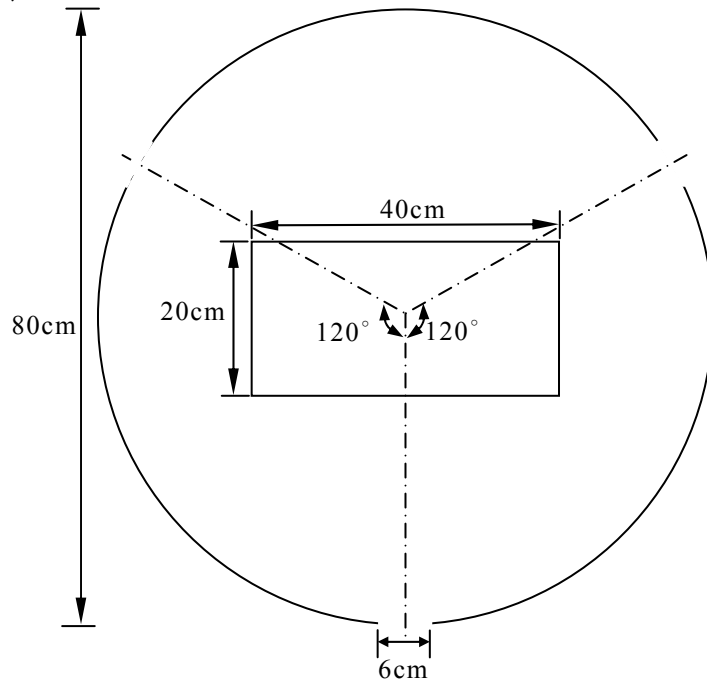
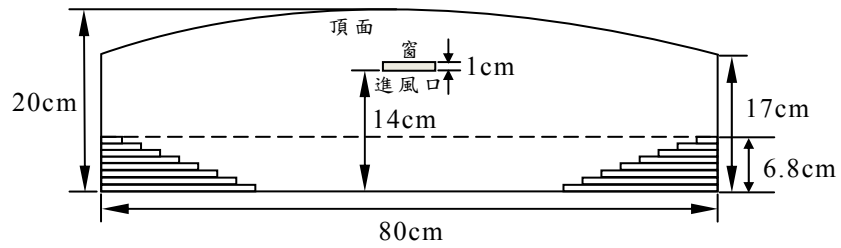


圖 3-16. 雙層矩形廠房模型尺寸圖
資料來源：本研究整理

(a) 俯視圖



(b) 前視圖



(c) 後視圖

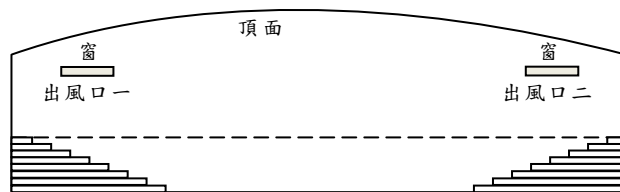


圖 3-17. 圓頂室內集會場館建築模型尺寸圖
資料來源：本研究整理

圖 3-18 至圖 3-20 與圖 3-21 至圖 3-23 分別顯示單層與雙層矩形廠房情況在三個水平風攻角之均勻來流下建築頂面平均內風壓係數 ($C_{p_i} = (p - p_o) / 0.5\rho U^2$; p_o 為參考壓力) 之量測結果。

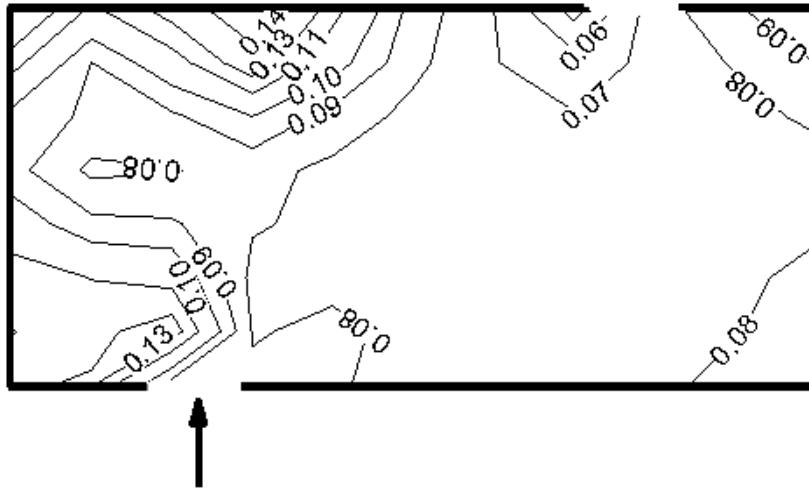


圖 3-18. 單層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=0^\circ$)
資料來源：本研究整理

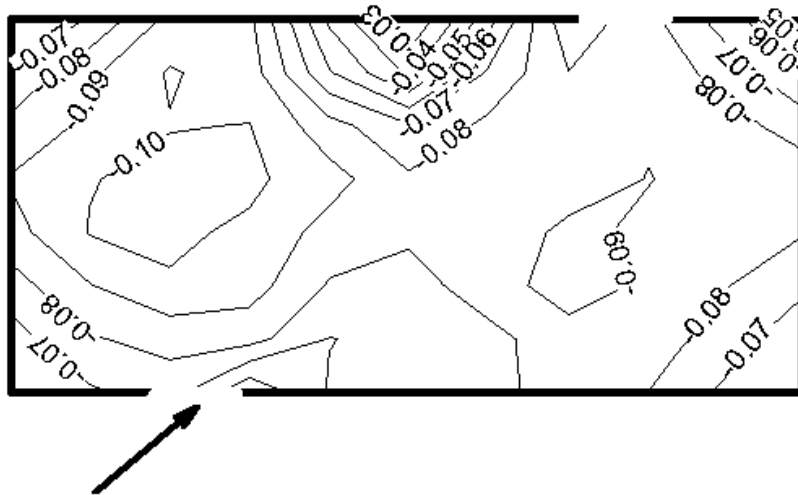


圖 3-19. 單層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=45^\circ$)
資料來源：本研究整理

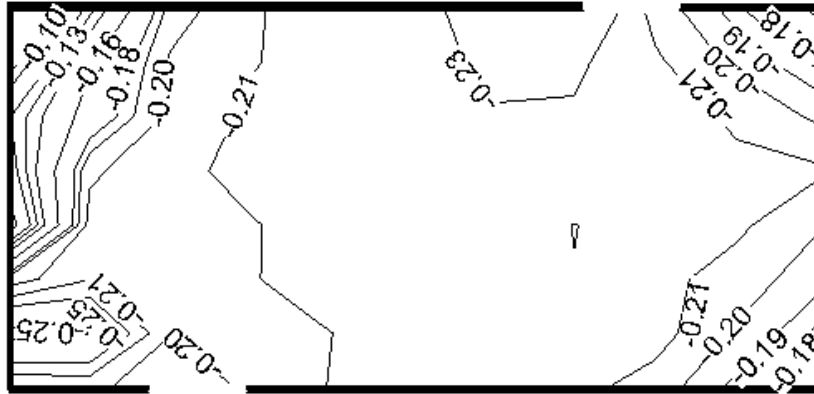


圖 3-20. 單層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=-45^\circ$)
資料來源：本研究整理

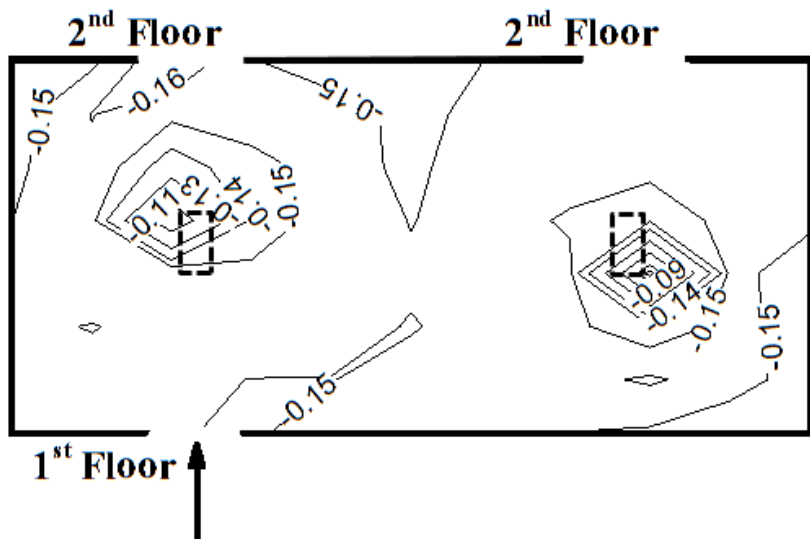


圖 3-21. 雙層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=0^\circ$)
資料來源：本研究整理

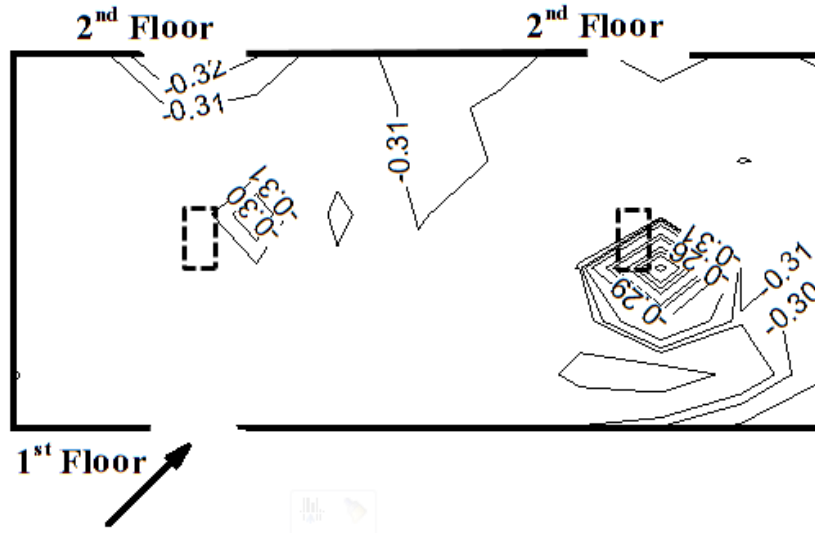


圖 3-22. 雙層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=-45^\circ$)
資料來源：本研究整理

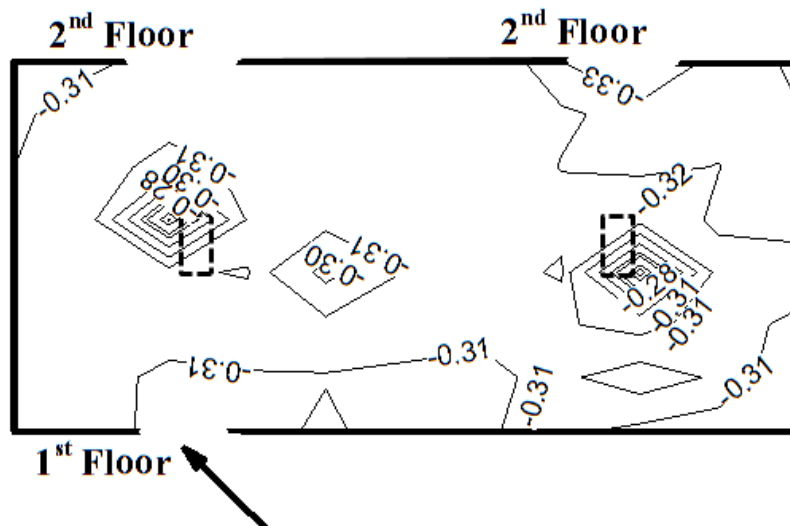


圖 3-23. 雙層矩形廠房頂面內風壓係數等值圖($\beta=45^\circ$)
資料來源：本研究整理

圖 3-24 至圖 3-26 顯示圓頂室內集會場館情況在三個水平風攻角之均勻來流下建築頂面平均內風壓係數之量測結果。

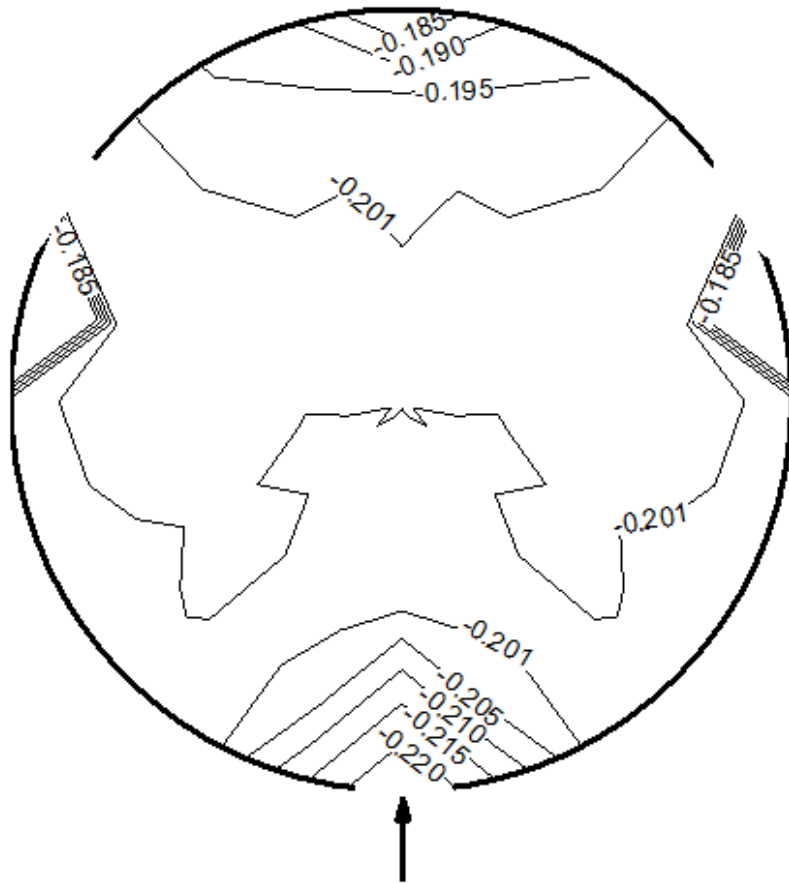


圖 3-24. 圓頂室內集會場館內風壓係數等值圖($\beta=0^\circ$)

資料來源：本研究整理

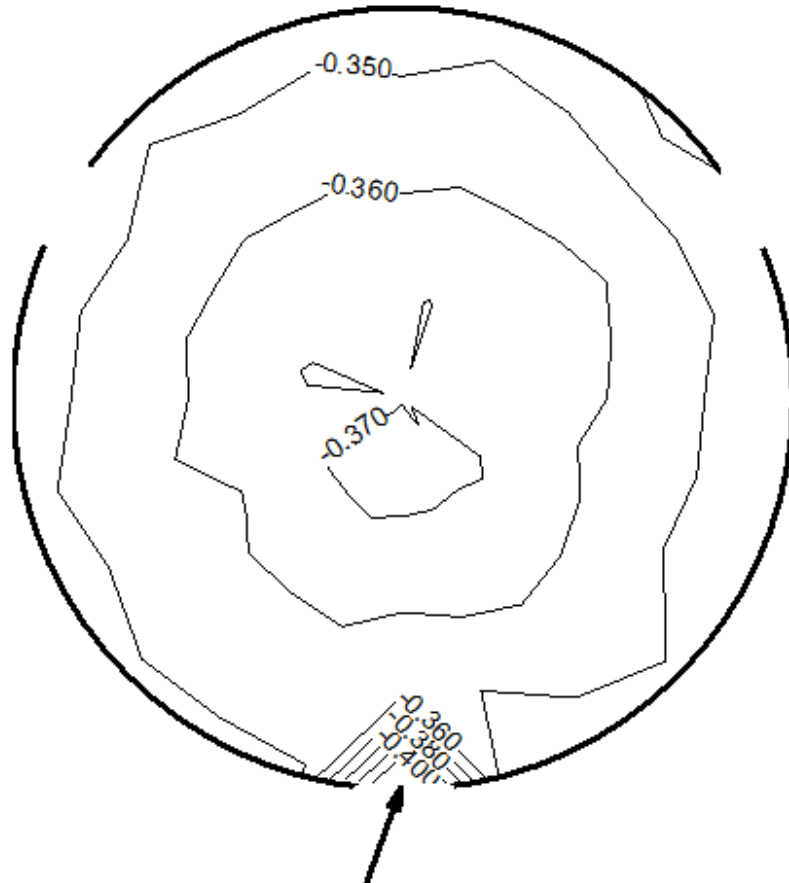


圖 3-25. 圓頂室內集會場館內風壓係數等值圖($\beta=15^\circ$)
資料來源：本研究整理

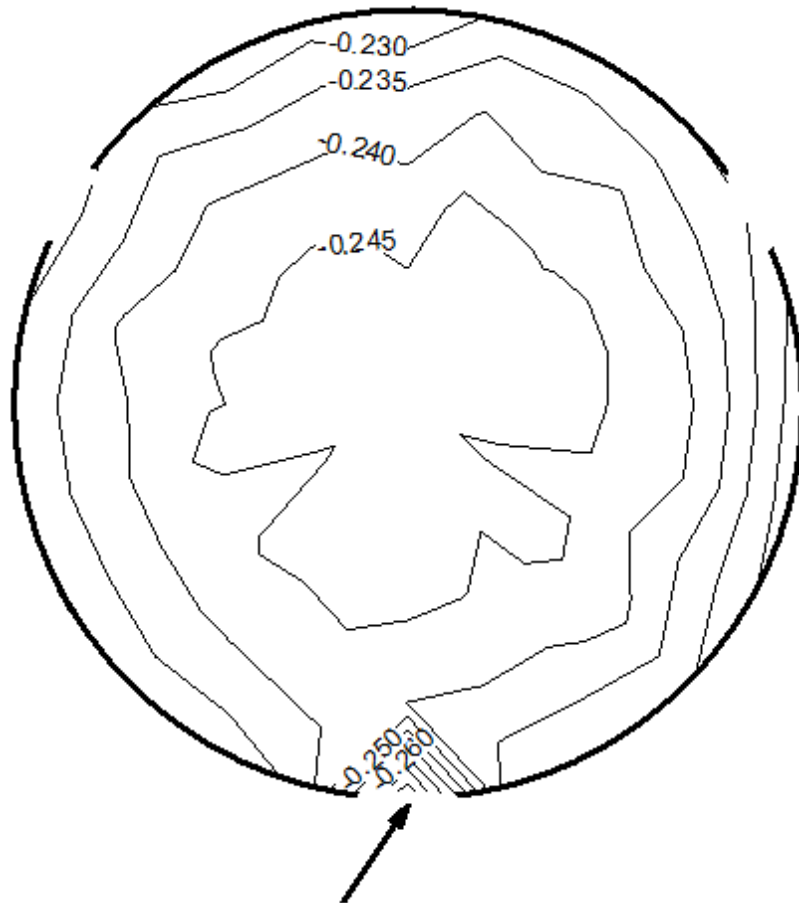


圖 3-26. 圓頂室內集會場館內風壓係數等值圖($\beta=30^\circ$)
資料來源：本研究整理

第四章 數值模擬方法與模式驗證

研究中主要係以計算流體動力學(computational fluid dynamics; CFD)的方法進行圓頂室內集會場館與矩形廠房之紊流流場模擬，並依據氣流場與濃度場結果，細部探討室內自然通風之功效。流場之數值模擬計算採用了 FLUENT 的 CFD 計算程式，茲說明如後。

第一節 FLUENT 套裝軟體說明

FLUENT 是美國 Ansys 公司所開發的計算流體力學套裝軟體。本軟體係以有限體積法(finite-volume method)，解析如後之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4-2)$$

其中， u 、 v 、 w 為速度在 x 、 y 、 z 三個方向之分量； t 為時間； f_x 、 f_y 、 f_z 為場加速度在 x 、 y 、 z 座標上之分量； p 為壓力； ρ 與 ν 分別為流體之密度與運動黏滯度(kinematic viscosity)。

FLUENT 係採用有限體積法為主要架構，進而求解連續方程式與動量方程式以獲取流場中的速度及壓力，以克服對於複雜幾何形狀計算值域的適用性問題。

基本上，在求解納維爾-史托克方程式(Navier-Stokes equation)時使用直接模樣(direct simulation)法因不引入任何的紊流模式，可以獲得最為準確的結果。但於求解一個三維空間的問題時，以目前電腦的運算速度及所需的計算時間尚未達實用的階段。因此，在一個時間域上的紊流流場中，可將流速與壓力分為平均量(mean)與擾動量(fluctuation)兩個部份，進而推衍出雷諾平均下的連續與動量方程式，此即 FLUENT 軟體中使用的 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)方法。

一、FLUENT 軟體架構與功能

(一) FLUENT 軟體之組成

FLUENT 軟體包括如後幾個部分：(參見圖 4-1)

- (1) FLUENT 求解器
- (2) prePDF：用於模擬 PDF 燃燒過程
- (3) GAMBIT：設置幾何形狀與網格生成
- (4) TGrid：額外的處理器，用於從現有的邊界網格來生成體網格。
- (5) Filters(Translators)：轉換由其它軟體生成的網格。

(二) 求解步驟

FLUENT 軟體求解之基本步驟為：

- (1) 使用 GAMBIT，幾何外形讀入與資料修改，並生成計算網格
- (2) 網格讀入求解器中
- (3) 檢查網格
- (4) 選擇求解的方程式：無黏滯流、層流或紊流
- (5) 設定邊界條件
- (6) 設定流體或介質特性
- (7) 設定計算內容（多相流、化學反應或燃燒）
- (8) 設定控制參數（格式、時間、輸入輸出參數）

- (9) 流場初始化
- (10) 進行迭代計算與過程監控
- (11) 輸出結果進行後處理計算。

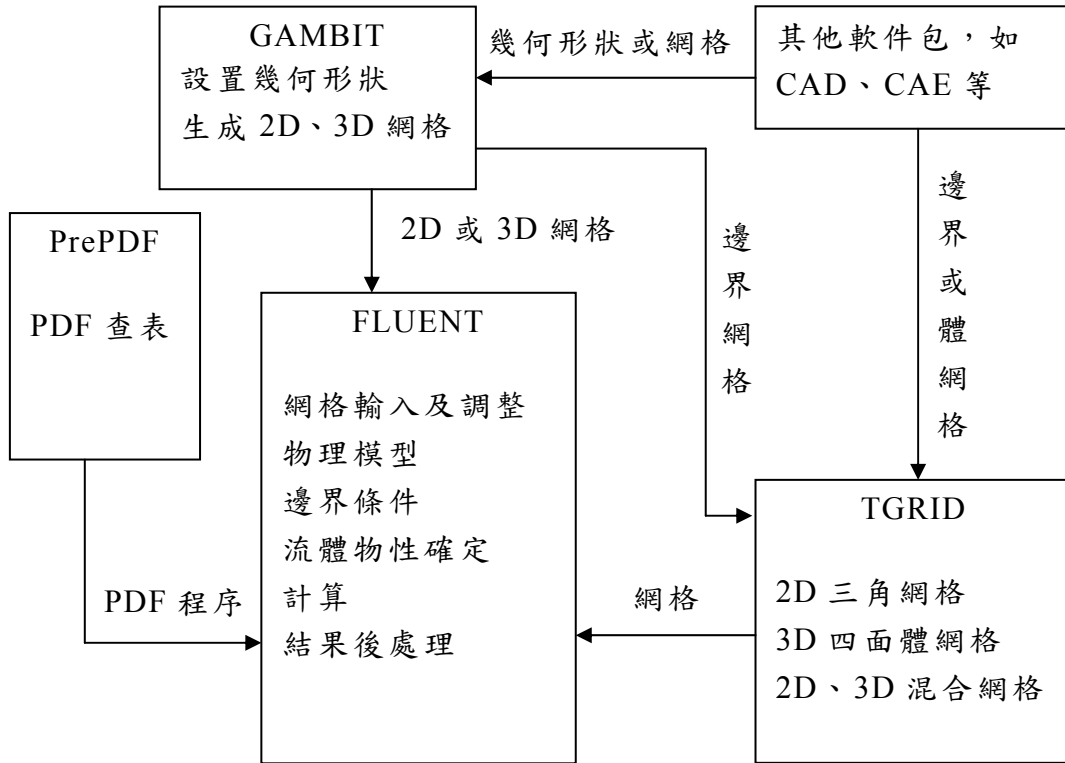


圖 4-1. FLUENT 基本程序結構示意圖
資料來源：本研究整理

(三)求解器的種類

FLUENT 中之求解器有如後四種選擇：

- (1) FLUENT 2d：二維單精度求解器
- (2) FLUENT 3d：三維單精度求解器
- (3) FLUENT 2ddp：二維雙精度求解器
- (4) FLUENT 3ddp：三維雙精度求解器

(四) 網格之形式

在建構幾何外型及生成網格的功能上，FLUENT 可以使用任意形狀的網格，包括二維的三角形和四邊形網格、三維的四面體、六面體、棱柱體、金字塔形、多面體網格與混合網格。此外，於 FLUENT 中也可運用網格單元與任意交界面的技術與局部加密技術相結合，利用自動網格生成器以快速產生非連續、完全非結構化之網格。其幾何處理能力包括：

- (1) 運用六面體、四面體、多棱柱、多面體可任意組合，適用於高度靈活的非結構化網格技術。
- (2) 任意網格相交的不連續網格連接技術。
- (3) 嵌入式網格加密用來增強局部的網格密度。

此種網格的自我適應能力對於求解的精度和對於較大梯度的流場(如自由剪切流和邊界層問題)有很實際的功效，網格調整只需要在要加密的區域裡實施，而非整個流場，因此可以節省計算時間。

(五) 邊界條件之選項

在邊界條件的設定上，FLUENT 提供了多種選擇，包括：

(1) velocity-inlet：速度入口

由於 FLUENT 在可壓縮流(compressible flow)的問題解析中會使得入流中總溫度及總壓力產生某種程度的波動，故本邊界條件只適用於不可壓縮流(incompressible flow)的流場計算。需要輸入的量值包括：速度大小、方向或各速度分量；轉動速度(軸對稱旋轉流動)和溫度(考慮能量情況)等。

(2) pressure inlet：壓力入口

適用於進口流量(flow rate)或流動速度未知的情況，如浮力驅動的流動問題。壓力進口條件亦可用於處理外部或非受限流動的自由邊界，對可壓縮流和不可壓縮流場之計算皆適用。需要輸入的量值計有

總壓力、總溫度、流動方向、靜壓力與紊流通量(turbulent flux)。

(3) mass-flow-inlet：質量流入口

本邊界條件主要適用於可壓縮流流場。質量之入口條件包含兩種：質量流率(mass flow rate)和質量通量(mass flux)。質量流率是單位時間內通過入口總面積的質量；質量通量是單位時間內通過入口單位面積的質量。

由於入口總壓力是持續變動的，可用以調節速度以達到給定的流量，然此使得計算的收斂速度變慢。因此，當壓力入口和質量入口條件均可適用時，宜優先考慮選擇壓力進口條件。至於在不可壓縮流場之情況中，由於密度為常數，因此可以考慮使用速度進口條件，而沒有必要選擇壓力入口邊界條件。

(4) inlet-vent：入口通風

用於給定通風問題之入口條件，包括：損失係數、流動方向、環境靜壓和靜溫度。在不考慮風扇厚度之假設下，壓力坡降正比於流體動壓和損失係數(head loss coefficient)。

(5) intake-fan：進氣風扇

用於模擬外部進氣風扇，需給定壓力坡降、環境靜壓力和靜溫度。在忽略風扇厚度之假設下，流體通過排氣扇的壓力坡降為流體速度的函數。如果是反方向流動，風扇可以視為通風出口，且其相應之損失係數為 1。

(6) outflow：自由流出口

用於模擬出口速度或者壓力未知的情況。由於出口處之流況視為完全發展(fully developed)者，於出口處無需給定速度與壓力，而是經由內部計算獲得。除了壓力外，其它變數之變化梯度皆為零。

值得一提的是，當已使用壓力進口條件，或在模擬可壓縮流問題、有密度變化的非恆定(unsteady)流動問題時(即使仍屬不可壓縮

流)，本邊界條件並不適用。

(7) pressure-outlet：壓力出口

本邊界條件需給定出口的靜壓。對於有回流的出口，該邊界條件比 outflow 邊界條件更容易收斂。如果有回流發生，給定的靜壓將視為總壓，因此無需再給定回流壓力，而回流流動方向與出口邊界垂直。不過，靜壓只限用於亞音速流場(sub-sonic flow)計算。若流場中局部出現超音速(super-sonic)的情況，則輸入之靜壓在計算過程中就不被採用。

(8) pressure-far-field：遠場壓力

本邊界條件只適用於理想氣體的計算問題(屬可壓縮流的範疇)，其適用於離重點區域足夠遠的位置，需要輸入的項目包括邊界之靜壓力、溫度及馬赫數。

(9) outlet-vent：出口通風

用於模擬出口通風情況，應給定損失係數、流動方向、環境靜壓和溫度。

(10) exhaust-fan：排氣風扇

用於模擬外部排氣風扇的情況，需給定壓力坡降、流動方向、環境靜壓和溫度。假定排氣扇無限薄，流體通過排氣扇的壓力坡降為流體速度的函數。在不考慮風扇厚度之假設下，流體通過排氣扇的壓力坡降為流體速度的函數。

(11) symmetry：對稱邊界

對稱邊界條件適用於計算區域中流場及溫度場為對稱的狀況。由於對稱軸或對稱平面上沒有流通量，因此垂直於對稱軸或對稱平面的變化梯度為零，而於計算中無需輸入任何參數。

(12) wall：固體邊界

針對黏滯性流(viscous flow)問題，FLUENT 認定固體邊界屬無滑

動(no-slip)條件，但當固體移動或轉動時可以指定固體表面切線向之速度分量，也可以給定壁面切應力的方程式來模擬壁面之物理特性。當處理熱流問題時，本邊界條件亦需輸入固定熱通量、固定溫度、對流換熱與外部輻射換熱係數等。

(六) FLUENT 之應用範疇

FLUENT 可供模擬應用之範疇包括：

- (1) 不可壓縮流與可壓縮流
- (2) 恆定與非恆定流動
- (3) 無黏滯流、層流與紊流(包含各種紊流模式)
- (4) 牛頓流體及非牛頓流體
- (5) 對流、傳導與輻射傳熱(包括固體內導熱、太陽輻射、透明固體輻射及可穿透介質中輻射的傳播)
- (6) 熱傳導與對流換熱耦合問題
- (7) 化學反應(包括氣體、液體與固體燃料燃燒)
- (8) 慣性座標系(靜止)和非慣性座標系(旋轉)下的流動模型
- (9) 可以處理熱量、質量、動量和化組成的源項
- (10) 尤拉及拉格朗日多相流(稀密相氣固、氣液、固液、液液系統)
- (11) 多孔介質流動
- (12) 一維風扇、熱交換器性能計算
- (13) 兩相流(two-phase flow)問題
- (14) 複雜形狀下的自由表面流動

(七) FLUENT 中紊流模式(turbulence model)之選項

FLUENT 在黏滯性流場(viscous flow)計算提供了數種紊流模式之應用，包括：Spalart-Allmaras 模式、標準 k- ϵ 模式、k- Ω 模式、Reynolds Stress 模式、DES(detached eddy simulation)模式與 LES(large eddy simulation)模式等。

二、FLUENT 軟體操作說明

(一) 模型建構與網格劃分

GAMBIT 為 FLUENT 的 CFD 前置處理器，用以從事模型之建構及網格之劃分。於此具有組合建構模型能力之前處理器中可訂定邊界條件，而核心解算與後處理則在 FLUENT 求解器中執行(參見圖 4-2)。

在建築物邊界條件之設定上，建築物迎風面、背風面、兩側風面和頂面皆設定為 wall。在計算區域方面，區域底部設定為 wall，其餘左側、右側及頂部皆設定為 symmetry。於開口位置之截面設定為 interior。至於在而出入流邊界部分，則選擇 velocity-inlet 入流邊界以及 outflow 出流邊界類型。待區域、邊界和網格三項模式設定完成後，即可輸出一個 .mesh 檔案以供 FLUENT 軟體進行後續之計算求解。

由於在 GAMBIT 中只能選擇邊界條件的形式，無法定義邊界值，其細節需在 FLUENT 設定。此外，如果沒有預先在 GAMBIT 中選定邊界條件的形式，FLUENT 會將所有邊界預設為 wall 之形式。

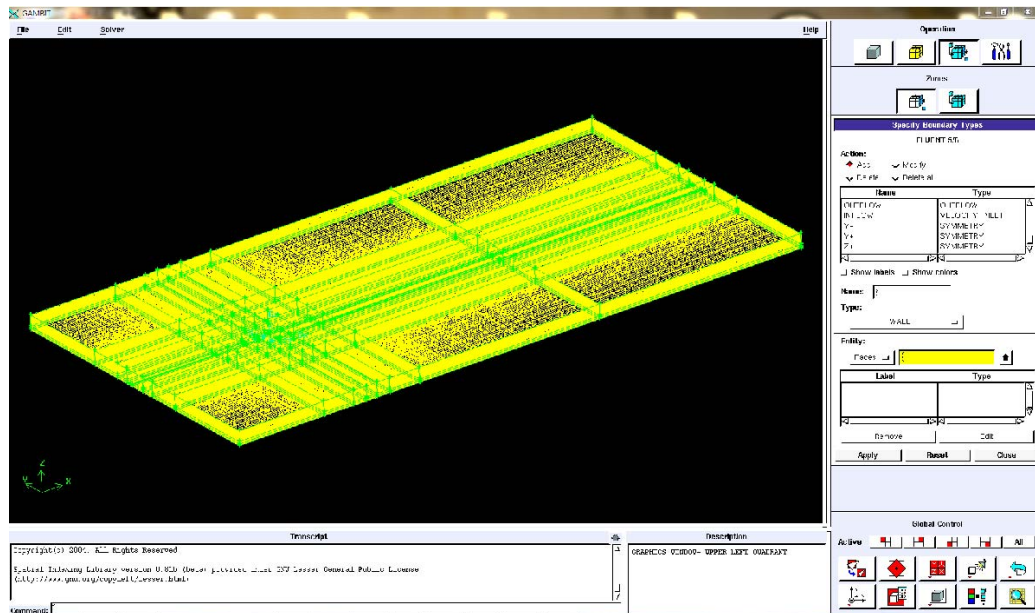


圖 4-2. GAMBIT 操作視窗
資料來源：本研究整理

(二) 模型與網格檢核

待模型完成建構後，操作者應續開啟 FLUENT 求解器。由於本研究之數值模擬係使用六核心電腦進行多核心運算(圖 4-3)，故於選定三維雙精度後(圖 4-4)即啟動求解器視窗，並依照 File-> Read-> Data 之操作路徑，讀入網格.msh 檔案。此時，視窗會顯示計算區域範圍座標和網格體積大小等參數以供核對(參見圖 4-5)，而後則依循 Grid-> Check 的路徑，至求解器內部檢核所讀入之網格是否有隱含之錯誤。



圖 4-3. FLUENT 求解器六核心運算設定
資料來源：本研究整理

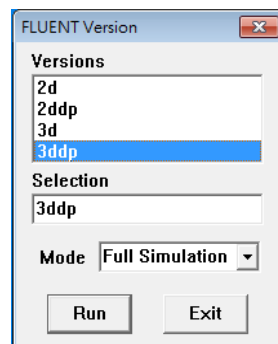


圖 4-4. FLUENT 求解器精度設定
資料來源：本研究整理

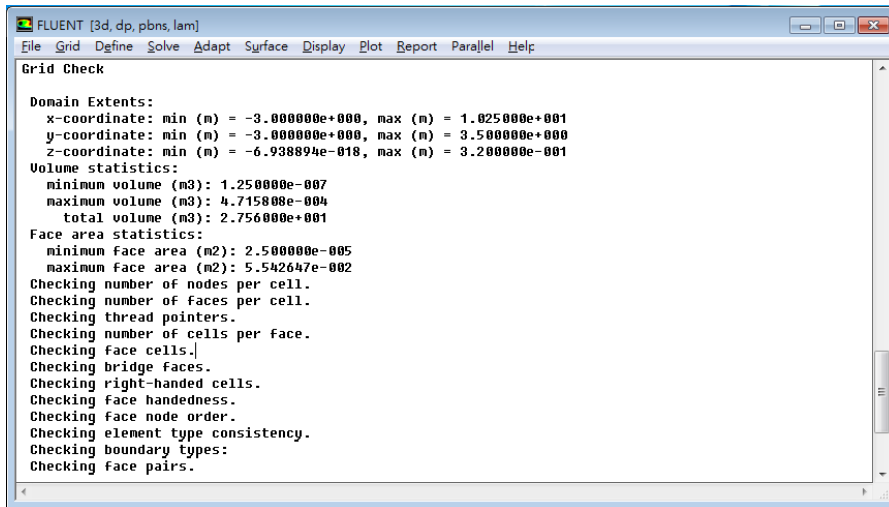


圖 4-5. FLUENT 求解器讀入網格資料

資料來源：本研究整理

(三) 求解設定

在進行計算之前，應作如後各項之設定：

(1) 分析項目：

在求解基礎條件的部分，使用內部預設設定，包括壓力控制、隱式解(Implicit)、非恆定(Unsteady)等選項(參見圖 4-6)。

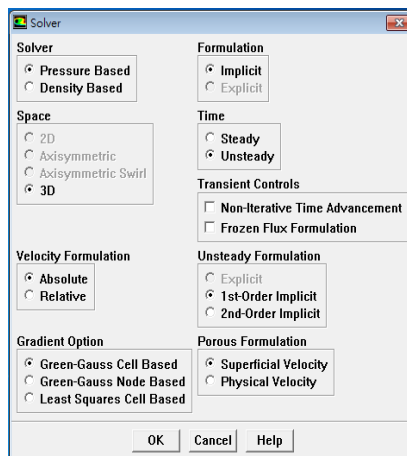


圖 4-6. FLUENT 求解設定視窗

資料來源：本研究整理

(2) 選擇紊流模型

研究中選用標準 k- ϵ 紊流模型，軟體中參數 C_μ 預設值為 0.09， $C_{1\epsilon}$ 預設值為 1.44， $C_{2\epsilon}$ 預設值為 1.92， σ_k 預設值為 1.0(圖 4-7)。

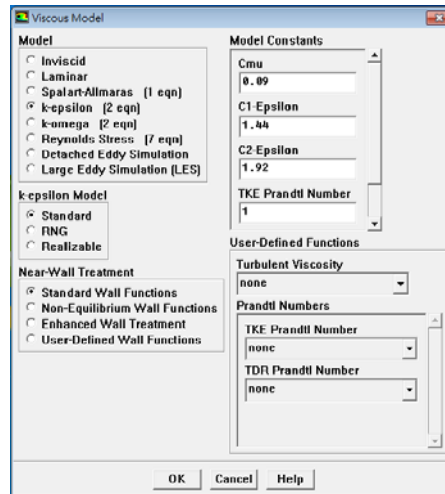


圖 4-7. FLUENT 紊流模型參數設定視窗

資料來源：本研究整理

(3) 定義來流邊界值

在來流邊界條件之給定上可應用 FLUENT 軟體的 UDF 外掛程式功能，讀入邊界上所有網格座標點相應之風速、紊流動能(turbulence kinetic energy)及紊流消散率(dissipation rate)等資料作為來流邊界值。在進行模擬時，軟體內部將會利用給定的來流邊界值作為基準以產生來流。其中，自行定義函數(UDF)是以 C 語言為基礎架構的編輯程序，它可以動態連結到 FLUENT 上以提高求解器性能，以定義出既定之邊界條件與屬性等(參見圖 4-8)。

使用 UDF 讀入檔案後，邊界值設定視窗內會呈現其他來流選項可供選擇，而有關速度向量、紊流動能、紊流消散率等項目之給定則分別選擇 udf x_velocity、udf k_profile、udf dissip_profile 作為來流設定依據(參見圖 4-9、圖 4-10)。

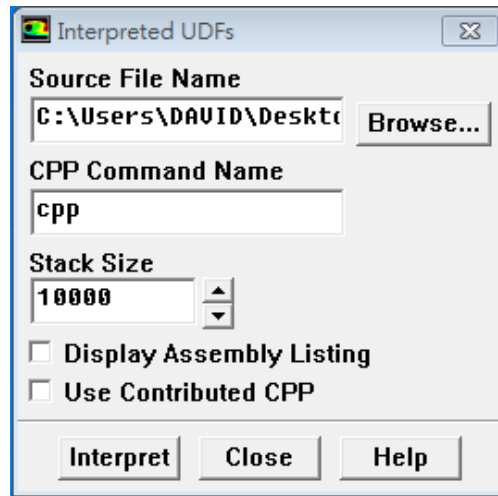


圖 4-8. FLUENT 來流邊界值 UDF 設定視窗
資料來源：本研究整理

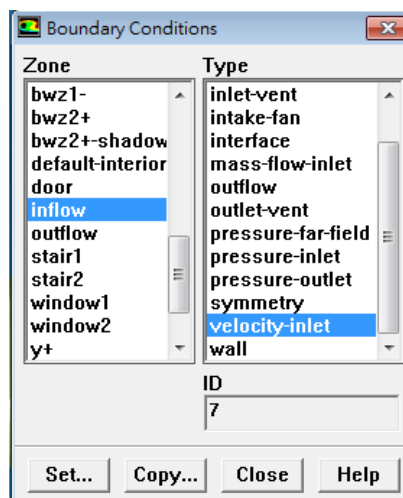


圖 4-9. FLUENT 邊界值設定視窗
資料來源：本研究整理

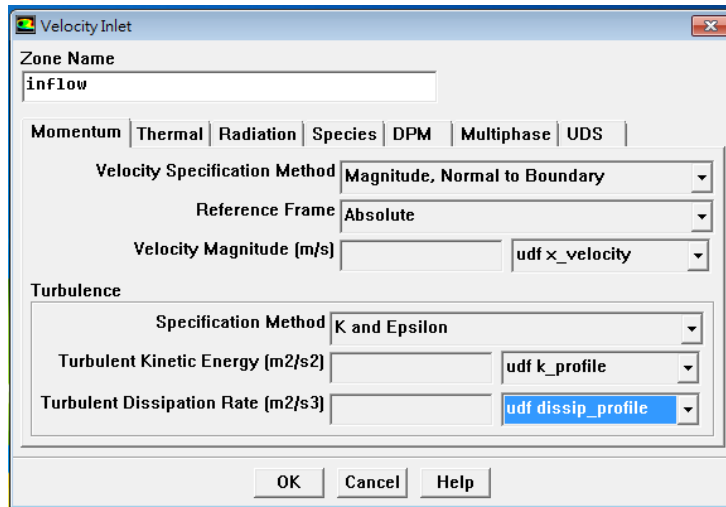


圖 4-10. FLUENT 來流邊界值設定視窗
資料來源：本研究整理

(4) 流體性質

研究問題中之流體為風，故將項目設定為fluid以及air流體，軟體會自行設定流體密度及流體黏滯度等(參見圖4-11)。但若另有需要，也可自行輸入所需之流體條件。

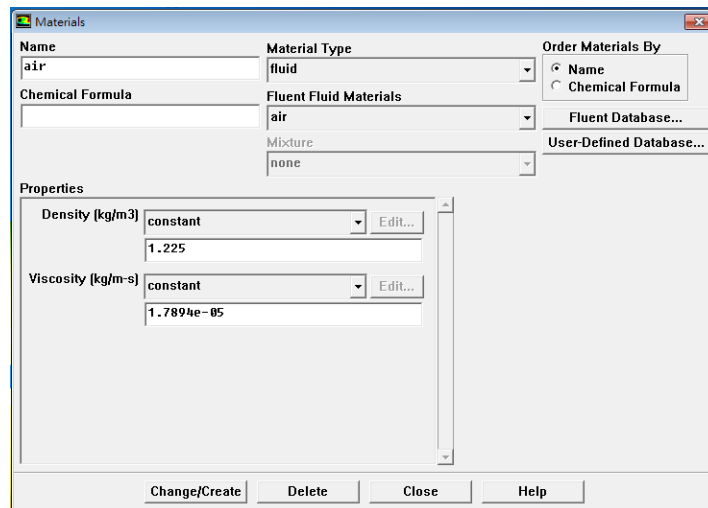


圖 4-11. FLUENT 流體性質設定視窗
資料來源：本研究整理

(5) 迭代計算設定

在進行計算之前要先設置初始條件，本數值模擬皆以零流場為初始情況(然也可以經由File-> read-> data的路徑讀入初始值給定 (參見圖4-12))。

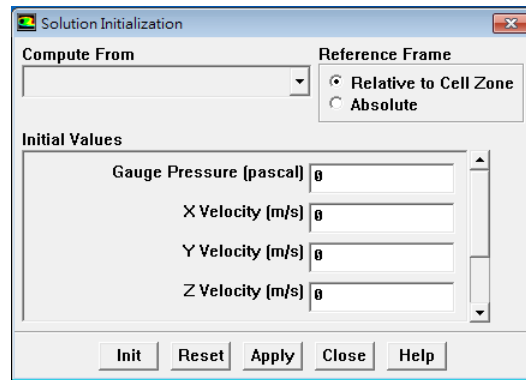


圖 4-12. FLUENT 計算初始值設定視窗

資料來源：本研究整理

此外，於計算進行中，為了要即時瞭解模擬過程與收斂的情況，可設定視窗來監視計算過程(見圖4-13與圖4-14)。

當進行非恆定情況之數值計算時，需要設定時間增量(time increment)、計算步數和每單位時間最多迭代次數等參數。儘管於隱式解法中對於時間增量並無限制，然針考量本研究中時變流(transient flow)問題模擬之精確度，將FLUENT中之最小時間(Δt)設定為0.001(sec) (參見圖4-15)。

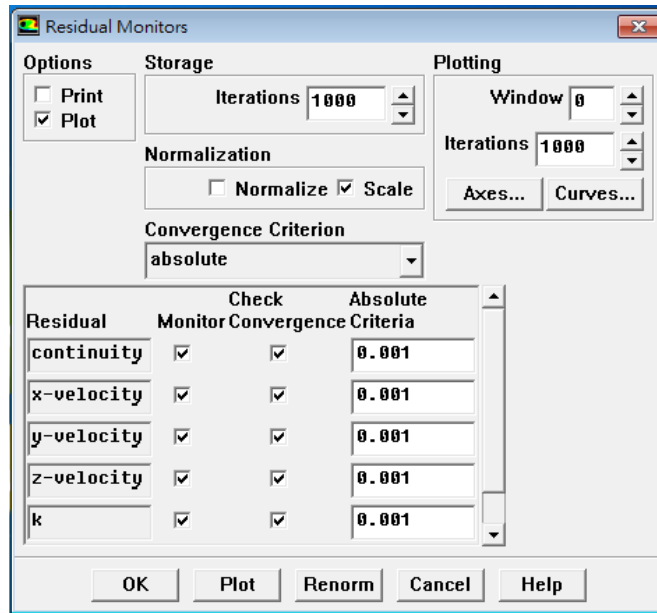


圖 4-13. FLUENT 計算殘值設定視窗

資料來源：本研究整理

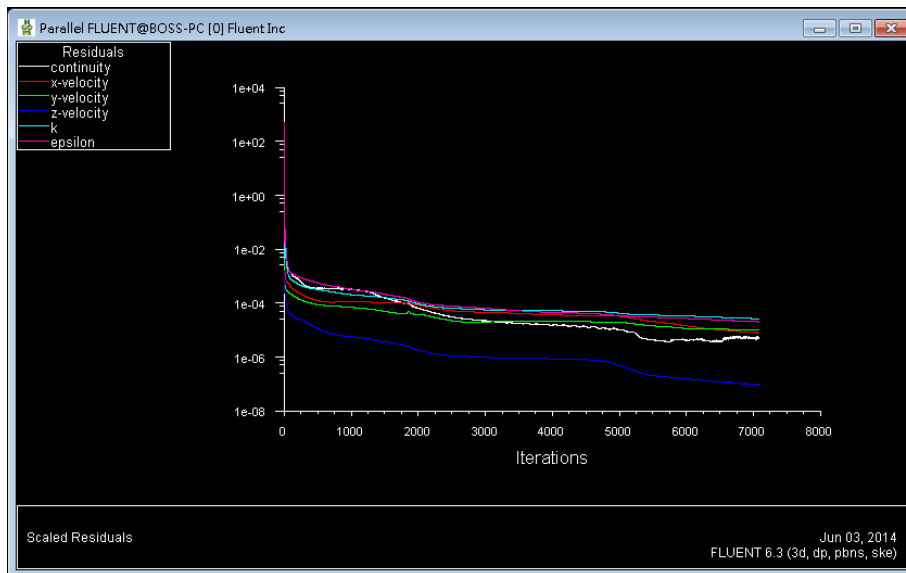


圖 4-14. FLUENT 計算監控視窗

資料來源：本研究整理

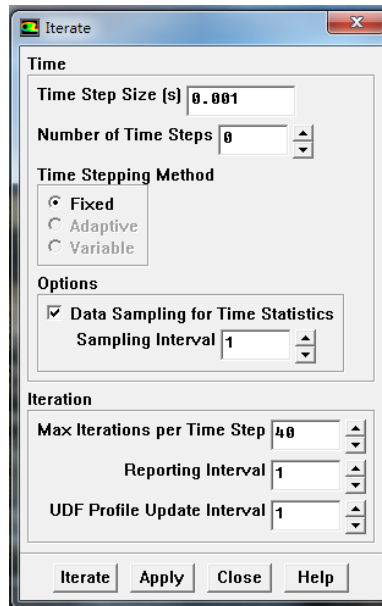


圖 4-15. FLUENT 迭代計算設定視窗

資料來源：本研究整理

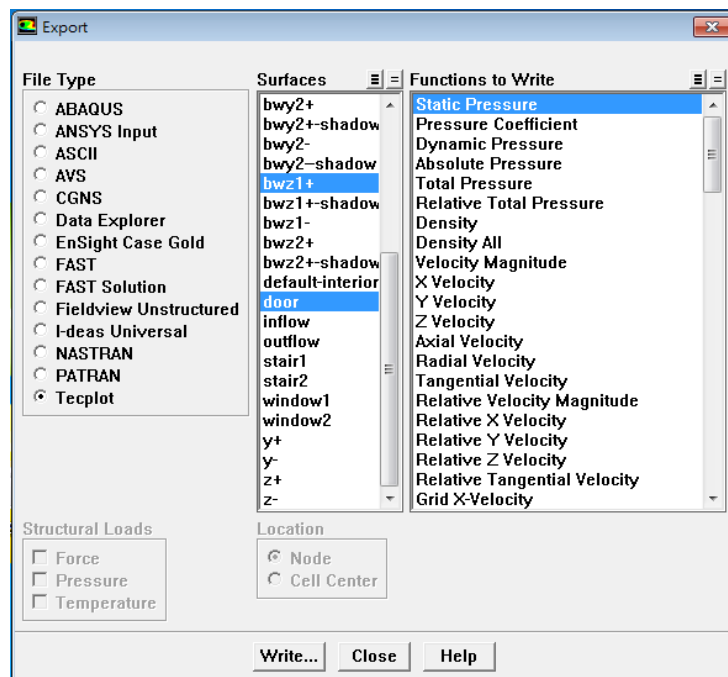


圖 4-16. FLUENT 輸出資料設定視窗

資料來源：本研究整理

(6) 資料之輸出

FLUENT 軟體本身具有後處理功能，也可輸出資料作後處理。計算中能將所需要的時序列資料(包括速度、壓力、紊流動能、紊流消散、紊流渦度等)依 File → Journal 的功能，設定於每次迭代完成後作自動輸出。由於輸出檔案格式可自行選擇，研究中選用 Teplot 繪圖軟體作為資料輸出的格式(參見圖 4-16)。

(四) 濃度場及溫度場模擬設定

(1) 濃度場模擬

於進行濃度場模擬時，利用軟體中的自行定義標量 UDS(user defined scalar)來求解，依照 Define->User Defined->Scalars 路徑，於面板中設定使用一個 UDS 方程，再選擇運算區域、通量函數及非穩態函數選項(參見圖 4-17)

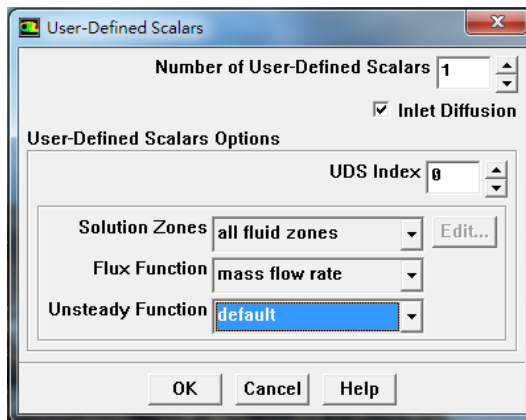


圖 4-17. FLUENT UDS 方程設定視窗

資料來源：本研究整理

於 Materials 面板中需設定濃度擴散係數，濃度擴散係數由紊流史密特數(turbulent Schmidt number)來推求，其定義如後：

$$S_c = \frac{\nu_t}{\Gamma_c} \quad (4-3)$$

式中 ν_t 與 Γ_c 分別為流體的紊流黏滯度(turbulent viscosity)及紊流擴散(turbulent diffusion)係數。研究中設定紊流史密特數為 0.8 [29] (參見圖 4-18)。

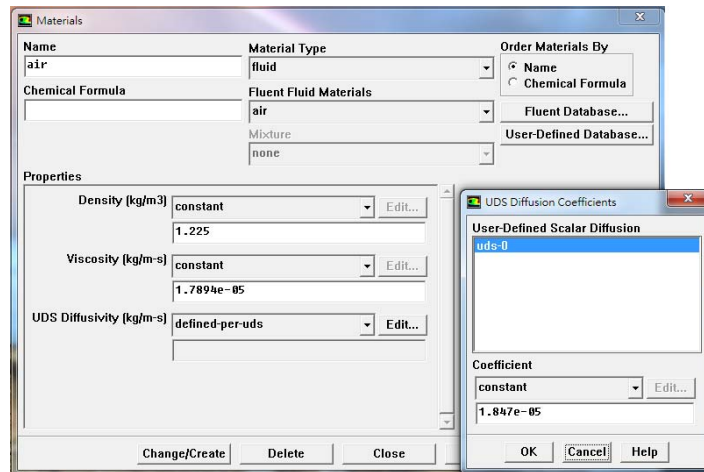


圖 4-18. FLUENT 濃度擴散係數設定視窗
資料來源：本研究整理

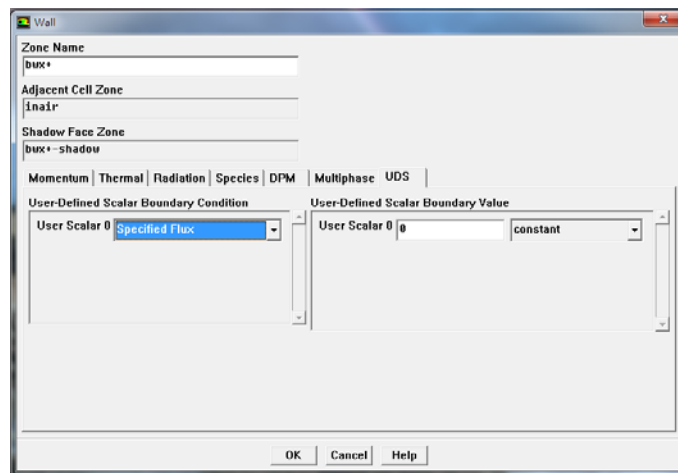


圖 4-19. FLUENT UDS 邊界條件設定視窗
資料來源：本研究整理

於邊界條件定義面板中固體邊界條件的 UDS 選項，User-Defined Scalar Boundary Condition 設為 Specified Flux，並將 User-Defined Scalar Boundary Value 設定為 0 (圖 4-19)。最後，於計算前設定流場之濃度初始值(Solve->Initialize->Patch) (圖 4-20)。

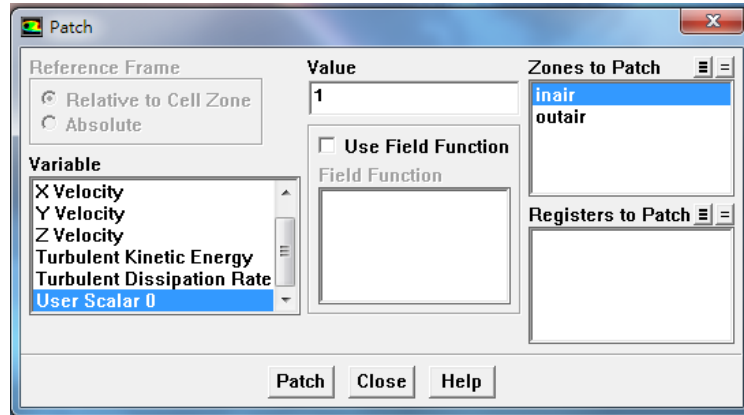


圖 4-20. FLUENT UDS 初始值設定視窗
資料來源：本研究整理

(2) 溫度場模擬

首先於 Energy 面板中激活能量方程計算(參見圖 4-21)。再於 Operating Condition 面板中激活重力選項，設置重力加速度的值及方向，並設定 Specified Operating Density(參見圖 4-22)。

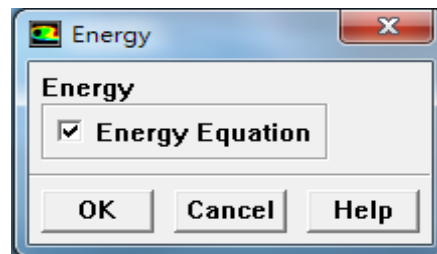


圖 4-21. FLUENT 能量方程設定視窗
資料來源：本研究整理

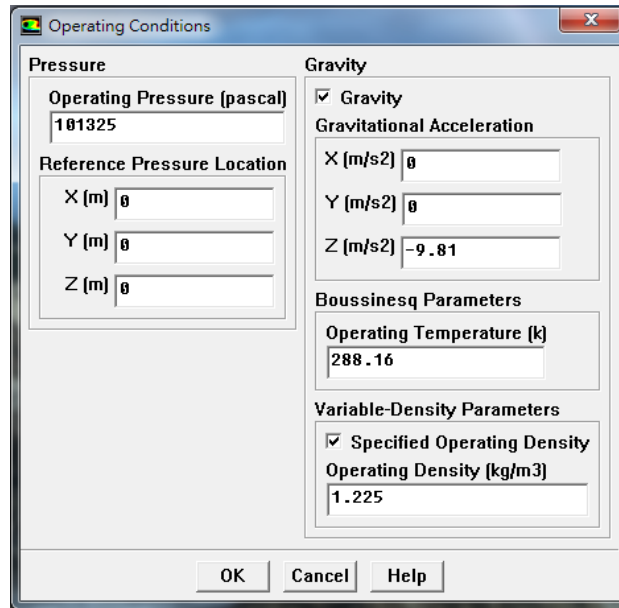


圖 4-22. FLUENT 操作條件設定視窗
資料來源：本研究整理

於 Materials 面板中，給定熱膨脹係數及紊流熱傳導係數。紊流熱傳導係數係由紊流普朗特數(turbulent Prandtl number)推求得知(研究採用 0.71 [30])，定義如後：

$$\text{Pr} = \frac{\nu_t}{\Gamma_T} \quad (4-4)$$

式中 Γ_T 為紊流熱傳導係數。

於邊界條件定義面板中的入流邊界條件中給定入流溫度，並於固體邊界條件的 Thermal 選項中設定其無熱傳遞。(參見圖 4-23)

最後於計算前設定流場之溫度初始值(Solve->Initialize->Patch)(圖 4-24)。

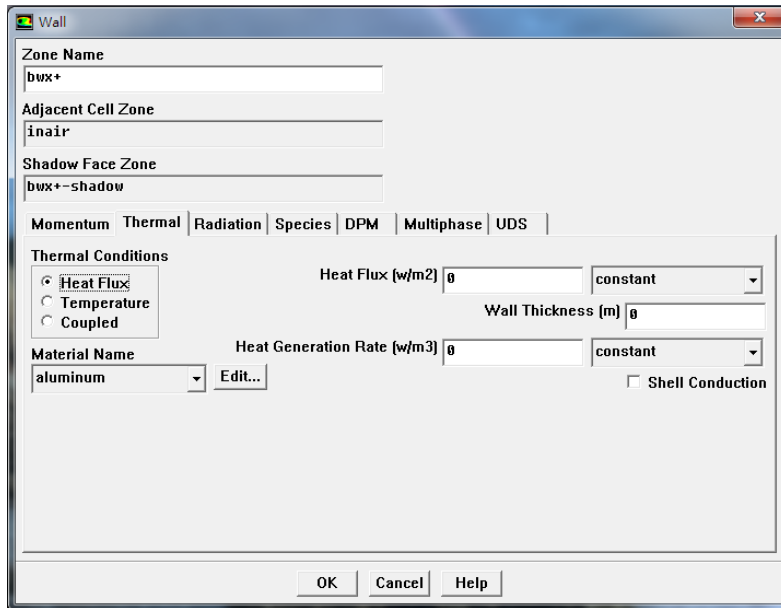


圖 4-23. FLUENT Thermal 邊界條件設定視窗
資料來源：本研究整理

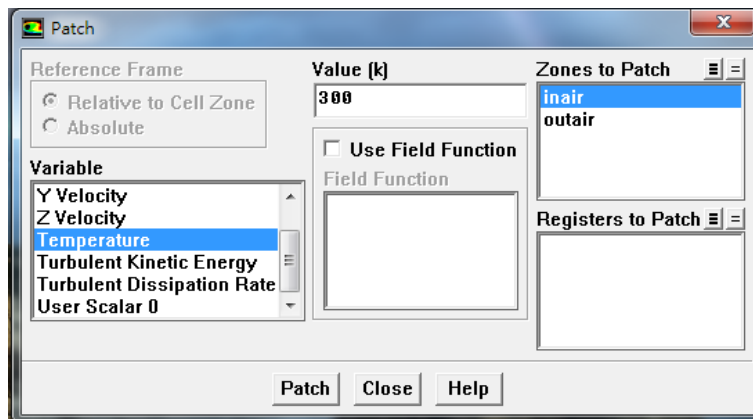


圖 4-24. FLUENT Thermal 初始值設定視窗
資料來源：本研究整理

第二節 數值預測結果之比對與模式驗證

研究中使用 FLUENT 軟體，針對矩形廠房與圓頂室內集會場館之紊流流場進行模擬，並與風洞模型試驗之量測結果進行比對，據以驗證數值模式在預測上之正確性。

一、頂面平均內風壓係數

依據數值計算結果，圖 4-25 至圖 4-27 顯示單層矩形廠房情況在三個水平風攻角 ($\beta=0^\circ$ 與 $\pm 45^\circ$) 之均勻來流下建築頂面平均內風壓係數量測與數值模擬結果之比較，二者間大致呈現不錯之吻合度。

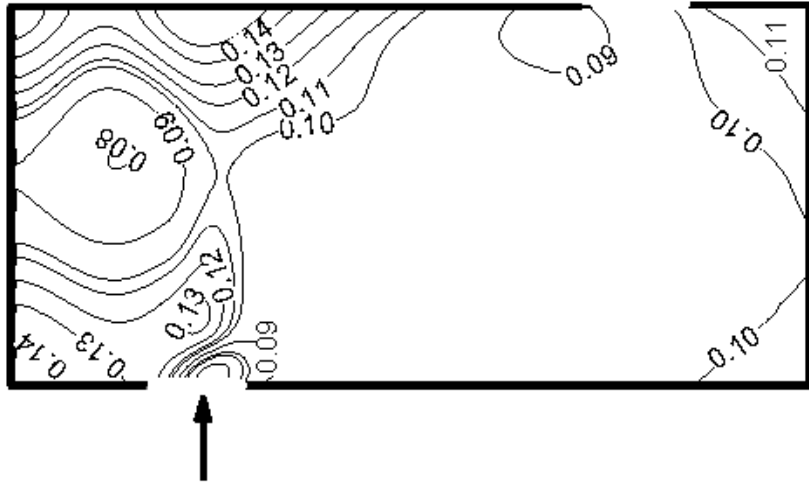
圖 4-28 至圖 4-30 顯示雙層矩形廠房情況在三個水平風攻角 ($\beta=0^\circ$ 與 $\pm 45^\circ$) 之均勻來流下建築頂面平均內風壓係數量測與數值模擬結果之比較，基本上二者間呈現不錯之一致性。

圖 4-31 至圖 4-33 則顯示圓頂室內集會場館情況在三個水平風攻角 ($\beta=0^\circ$ 、 15° 與 30°) 之均勻來流下建築頂面平均內風壓係數量測與數值模擬結果之比較，結果亦呈現相當程度之一致性。

二、進出風口之壓力差

表 4-1 至表 4-3 列舉出單層矩形廠房、雙層矩形廠房與圓頂室內集會場館三個模型情況進/出風口平均壓差係數之試驗與模擬結果比較(參見圖 3-15 至圖 3-17)，顯示出數值模式在風場預測上具有不錯之準確性。

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

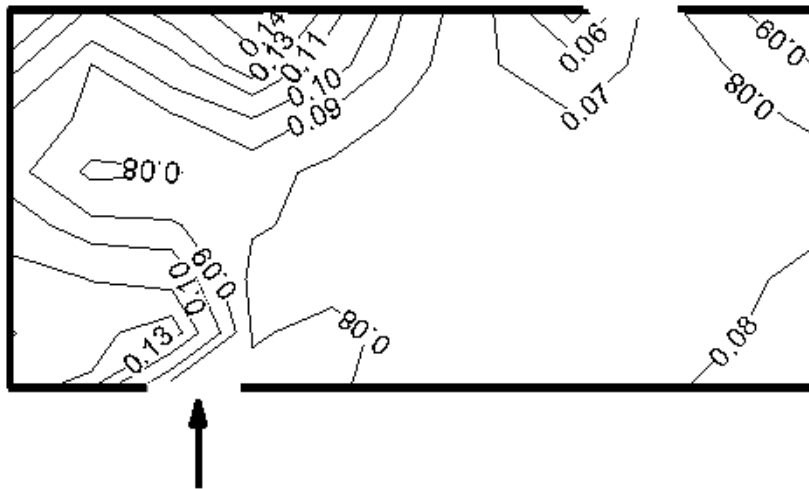
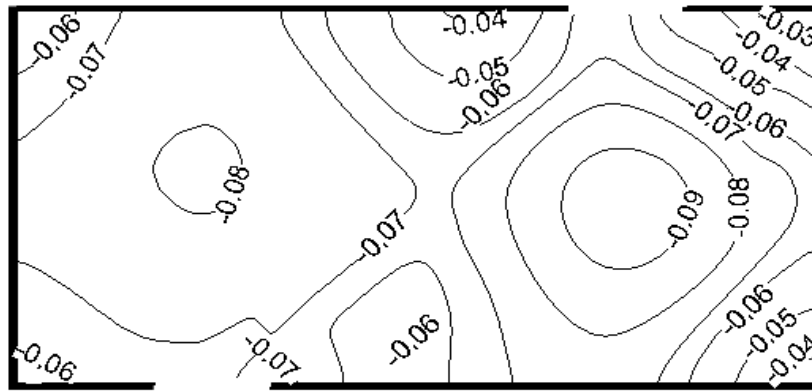


圖 4-25. 單層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=0^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

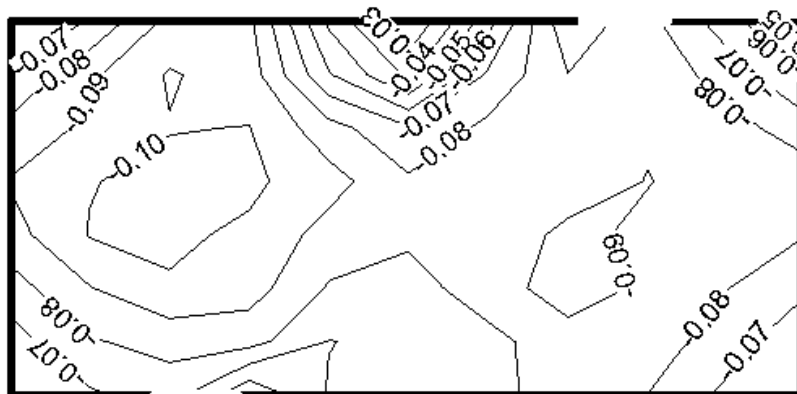
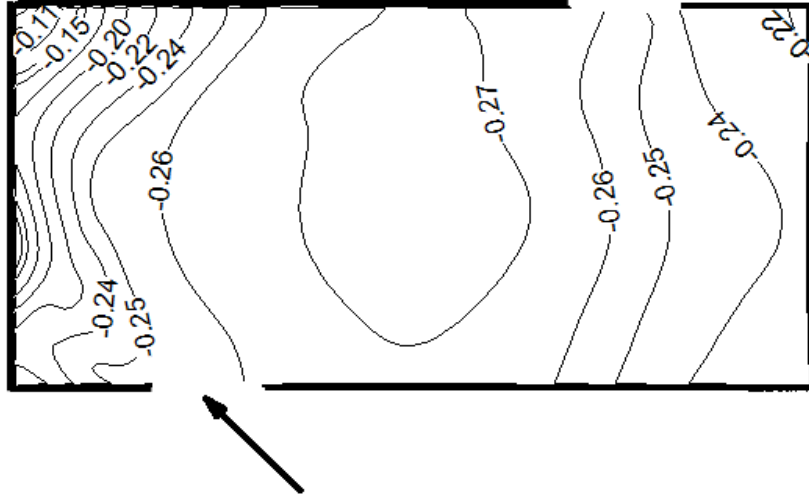


圖 4-26. 單層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=45^\circ$)

資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

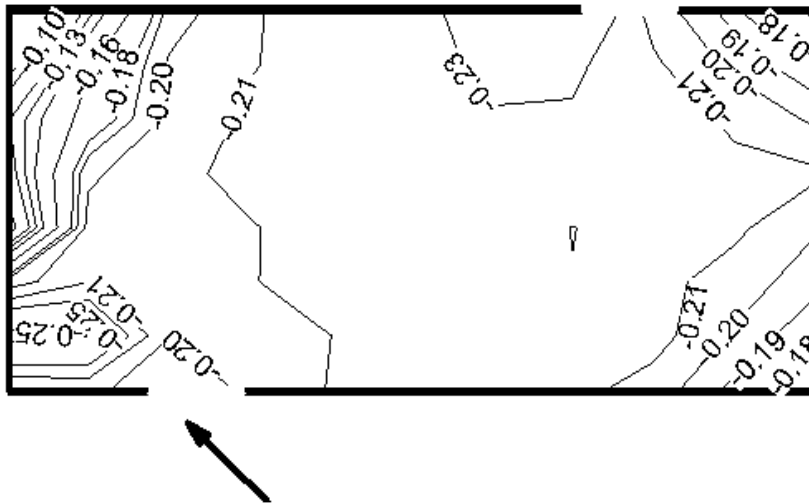
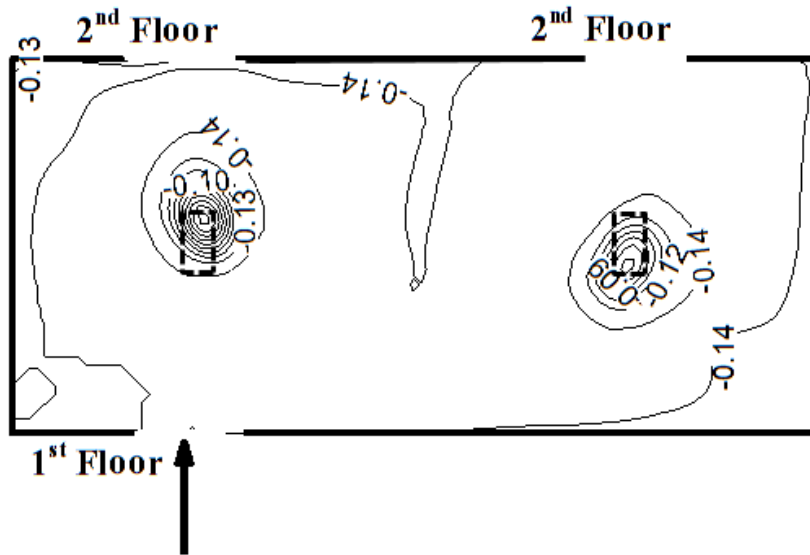


圖 4-27. 單層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=-45^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

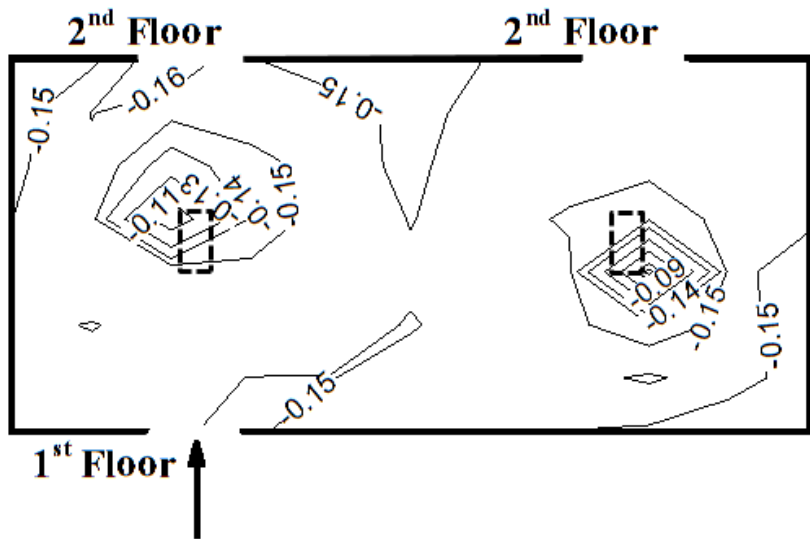
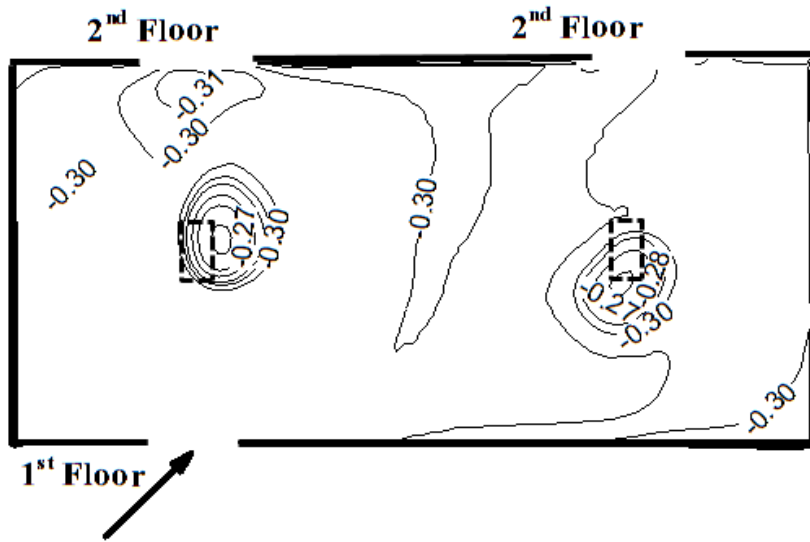


圖 4-28. 雙層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=0^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

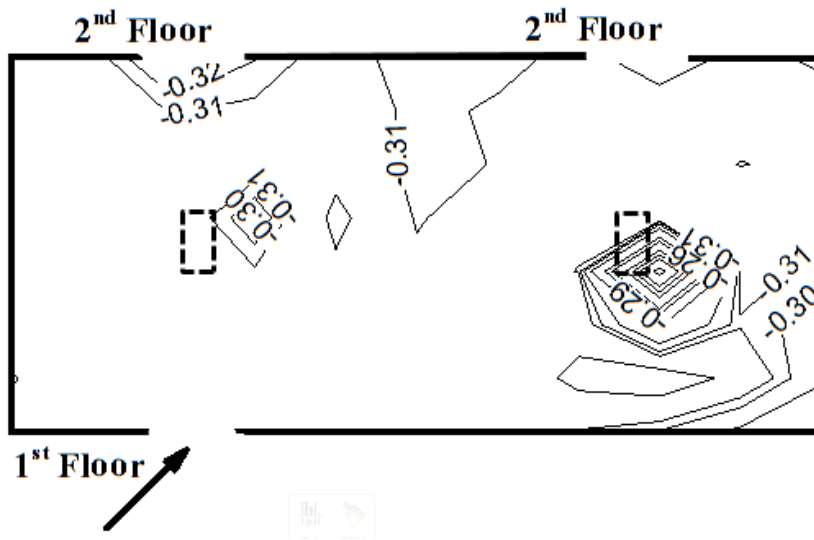
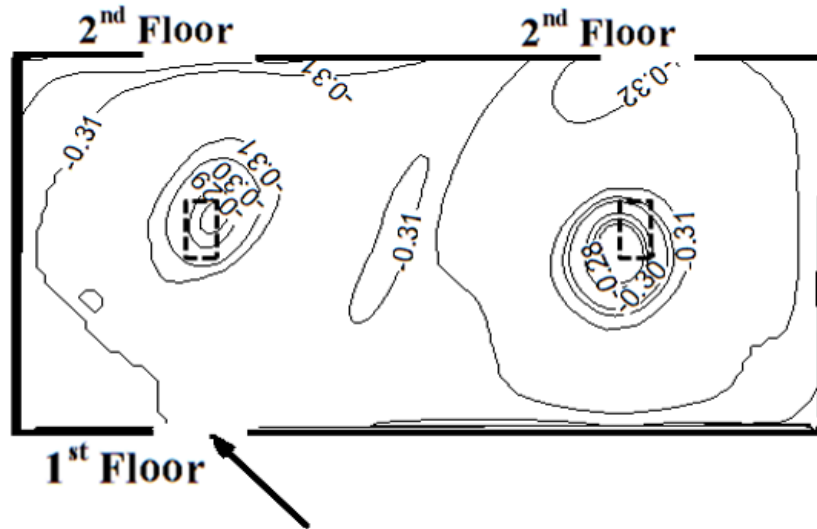


圖 4-29. 雙層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=45^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

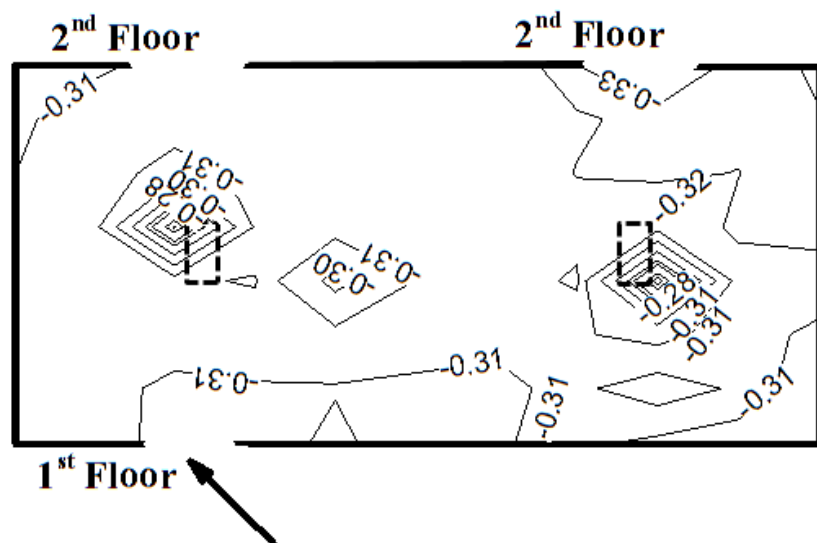
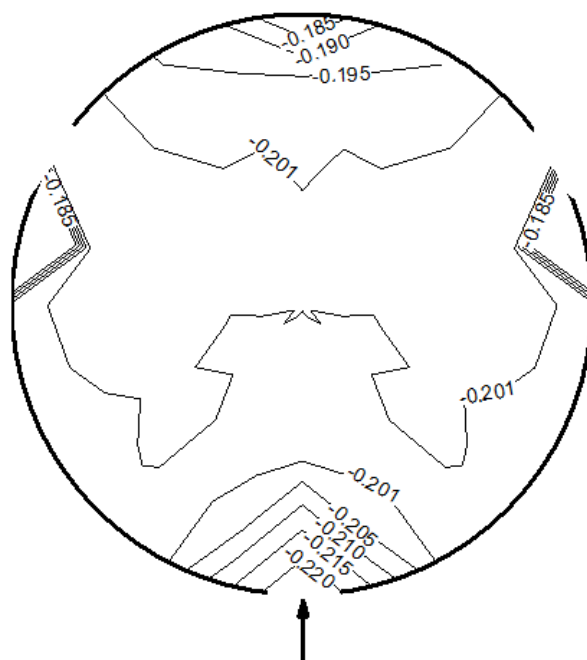


圖 4-30. 雙層矩形廠房頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=-45^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

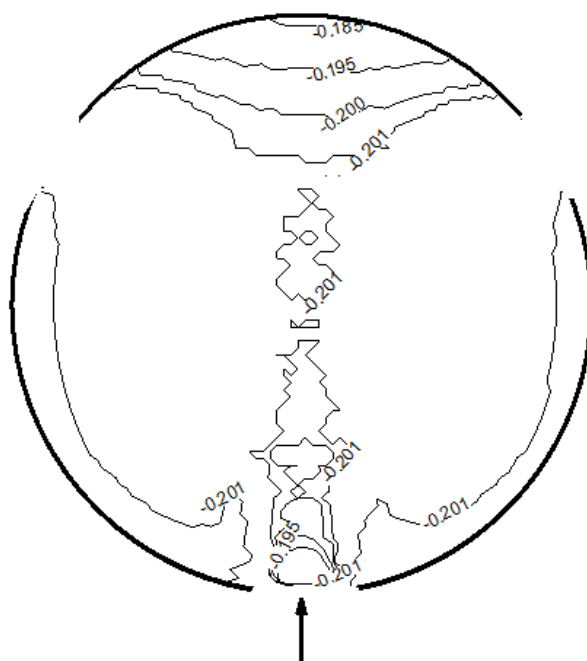
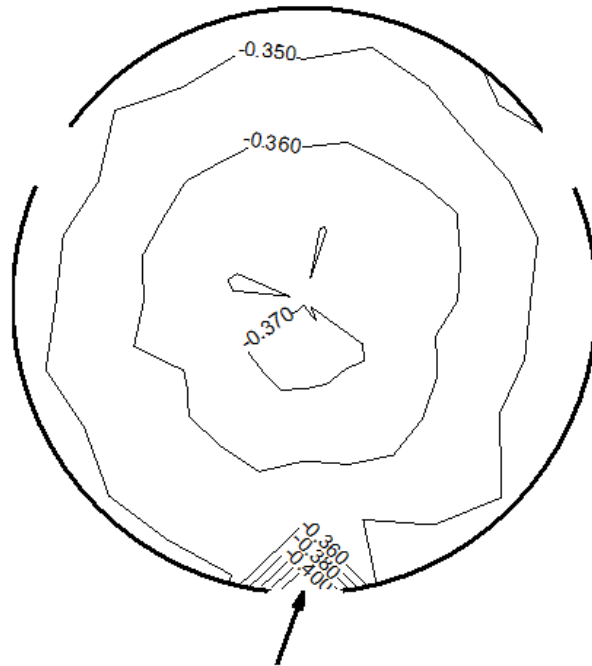


圖 4-31. 圓頂集會場館頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=0^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

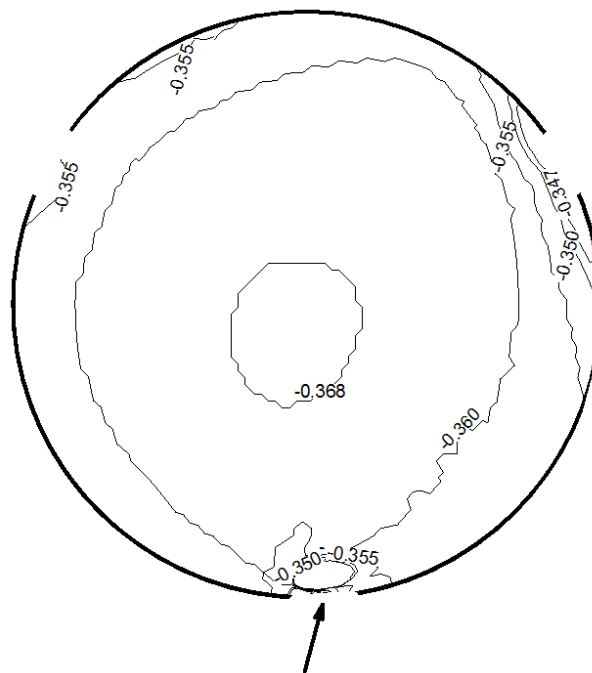
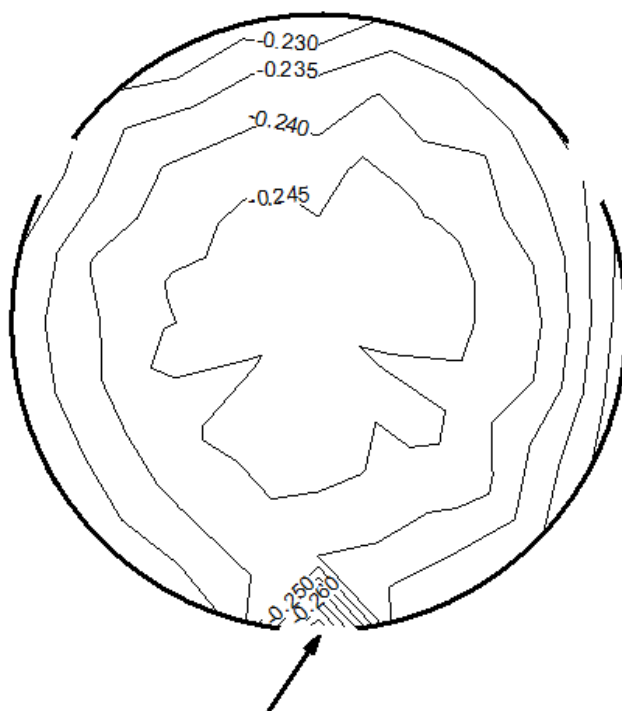


圖 4-32. 圓頂集會場館頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=15^\circ$)
資料來源：本研究整理

(a) 數值模擬結果



(b) 試驗量測結果

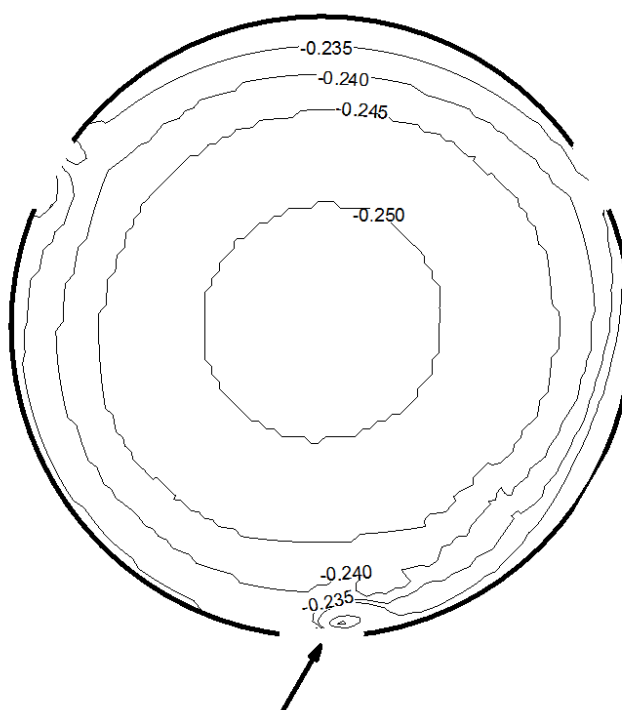


圖 4-33. 圓頂集會場館頂面平均內風壓係數比較圖($\beta=30^\circ$)
資料來源：本研究整理

表 4-1. 單層矩形廠房模型進/出風口平均壓差係數比較表

風攻角	實驗值	FLUENT
0°	0.361	0.379
45°	0.255	0.240
-45°	0.360	0.334

資料來源：本研究整理

表 4-2. 雙層矩形廠房模型進/出風口平均壓差係數比較表

風攻角		實驗值	FLUENT
0°	出風口 1	0.455	0.463
	出風口 2	0.447	0.462
45°	出風口 1	0.569	0.584
	出風口 2	0.358	0.372
-45°	出風口 1	0.287	0.270
	出風口 2	0.437	0.423

資料來源：本研究整理

表 4-3. 圓頂室內集會場館模型進/出風口平均壓差係數比較表

風攻角		實驗值	FLUENT
0°	出風口 1	0.197	0.181
	出風口 2	0.191	0.183
15°	出風口 1	0.156	0.133
	出風口 2	0.118	0.100
30°	出風口 1	0.103	0.119
	出風口 2	0.014	0.008

資料來源：本研究整理

第三節 流場檢視與分析

茲針對前述試驗情況矩形廠房個案之流場預測結果進一步地從事流場檢視，據以瞭解室內中氣流之變化與機制。

一、單層矩形廠房情況

圖 4-34 至圖 4-36 顯示三個水平風攻角(β)相應之單層矩形廠房水平面(距地面 1cm 高，即進風口半高處)速度向量分佈與無因次水平速度等值圖。在 β 為 0° 的情況中，氣流自進風口進入後產生了一個近於正向射流(jet flow)的流態，並於左、右側分別形成了逆時針與順時針方向的渦流(圖 4-34)，然因受出風口出流之影響，右側渦流之結構性相對地較不明顯。當 β 為 45° 時，進風口射流有直接朝向出風口流動之勢，使得右側渦流的結構更趨明顯(圖 4-35)。至於在 β 為 -45° 的情況(圖 4-36)，進風口射流襲向廠房左側壁，於角隅處產生了規模較小的逆時針向渦流，而於射流右方之順時針向渦流則占了廠房空間頗大的比例。

依據數值模擬之流場結果，表 4-1 顯示單層矩形廠房在三個來流水平風攻角下相應流量換氣率(ACH; air change rate)之結果。其中，

$$ACH_R = \frac{Q}{V} \quad (4-5)$$

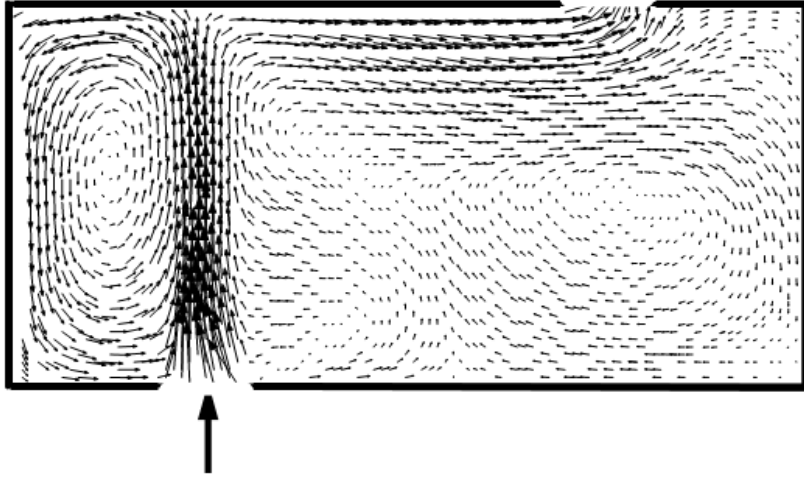
式中， Q 為流入室內的空氣流量， V 為室內空間的體積(0.005 m^3)。由表可見，在 β 為 0° 時換氣率最高，其次為 -45° 的情況， β 為 45° 時最低。

表 4-4. 單層矩形廠房模型個案流量換氣率比較表

風攻角 β	ACH _R	
	(s ⁻¹)	(Hr ⁻¹)
0°	1.48	5328
45°	1.06	3816
-45°	1.24	4464

資料來源：本研究整理

(a) 速度向量分佈



(b) 水平速度值分佈

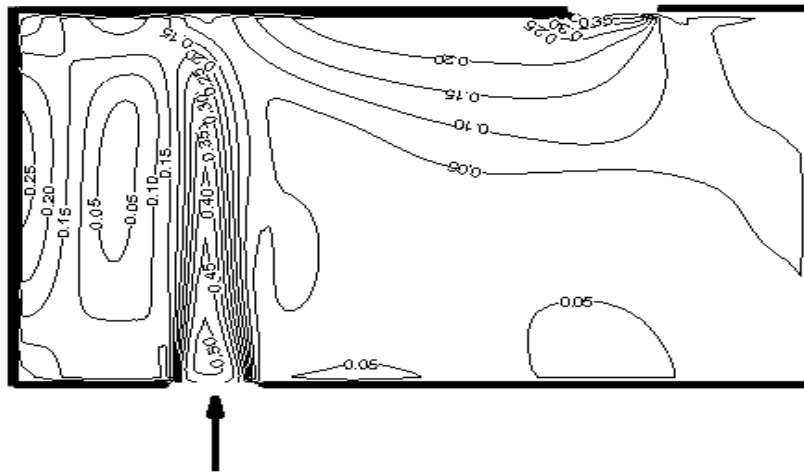
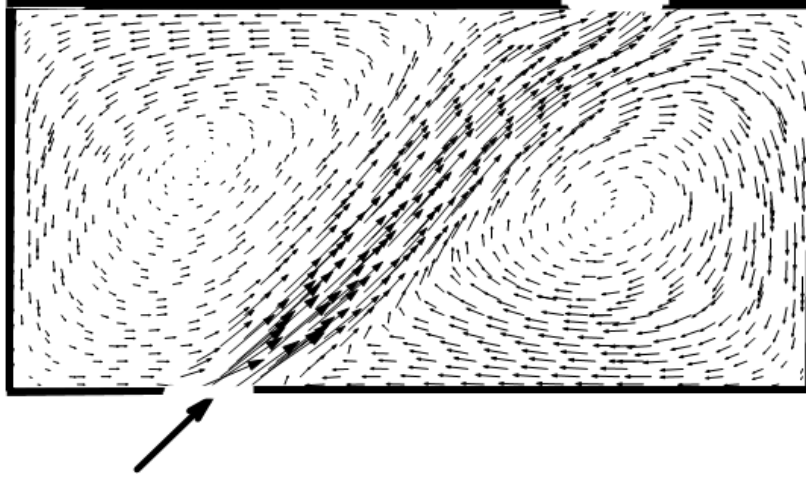


圖 4-34. 單層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$)

資料來源：本研究整理

(a) 速度向量分佈



(b) 水平速度值分佈

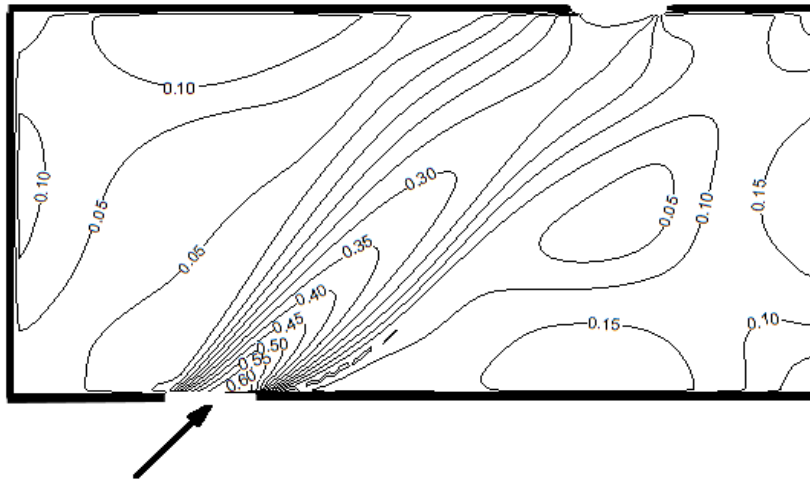
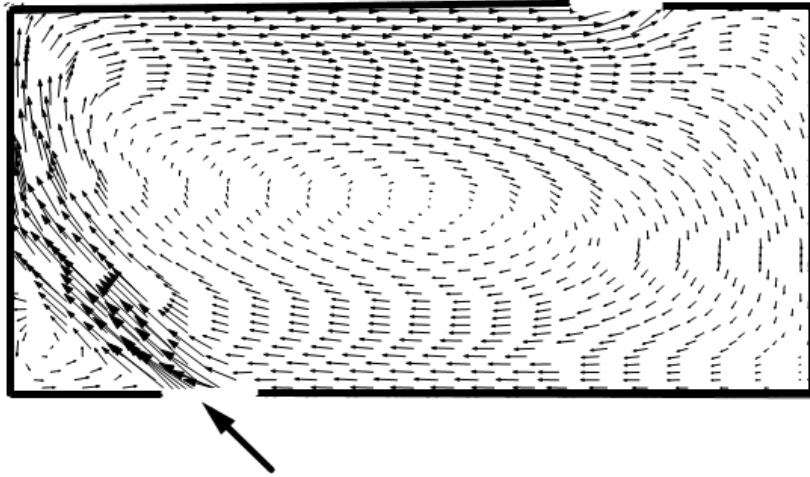


圖 4-35. 單層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖 ($\beta=45^\circ$)

資料來源：本研究整理

(a) 速度向量分佈



(b) 水平速度值分佈

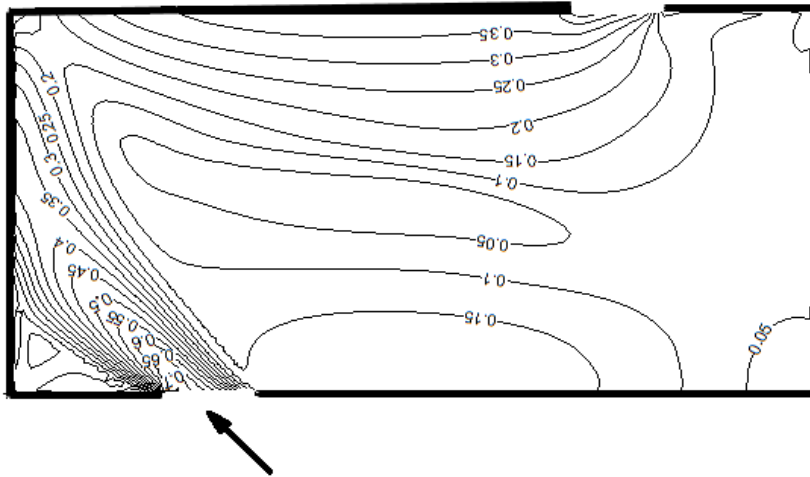


圖 4-36. 單層矩形廠房進風口半高處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=-45^\circ$)

資料來源：本研究整理

二、雙層矩形廠房情況

圖 4-37 至圖 4-39 顯示雙層矩形廠房三個來流水平風攻角相應之水平面(第一層樓位於進風口半高處，第二層樓位於出風口處)速度向量分佈與無因次水平速度等值圖。

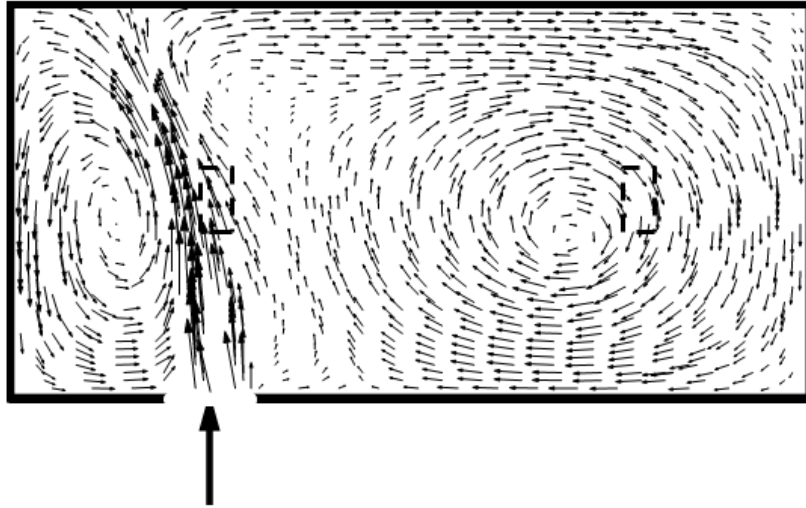
在 β 為 0° 的情況(圖 4-37)中，第一層樓中(進風口半高處水平面)由於受到左側樓梯口之影響，較之於單層廠房結果(圖 4-34)，氣流於進風口處之正向射流略呈向左偏移之現象，右測形成之順時針方向渦流則受到右側樓梯口之影響而更趨明顯。另在第二層樓中(出風口處水平面)，自左右兩個樓梯口之入流與兩個出風口之出流則掌控了本樓層主要之流態。數值結果顯示，左、右兩個出風口之出流量約略相同(分別為 $0.0032 \text{ m}^3/\text{s}$ 與 $0.0031 \text{ m}^3/\text{s}$)。

當 β 為 45° 時(圖 4-38)，第一層樓中(進風口半高處水平面)之流態與單層廠房結果(圖 4-35)類似，然因受到兩個樓梯口之影響，左右兩側形成之順時針與逆時針方向渦流結構更為顯著。至於在第二層樓中(出風口處水平面)之基本流態與 β 為 0° 時相仿，然於左側出風口之出流量明顯高於右側出風口(分別為 $0.0042 \text{ m}^3/\text{s}$ 與 $0.0010 \text{ m}^3/\text{s}$)。

在 β 為 -45° 之情況(圖 4-39)，第一層樓中(進風口半高處水平面)之流態與單層廠房結果(圖 4-36)類似，在第二層樓中(出風口處水平面)之流態形勢亦與其他兩個水平風攻角情況相仿，但左側出風口之出流量明顯低於右側出風口(分別為 $0.0013 \text{ m}^3/\text{s}$ 與 $0.0034 \text{ m}^3/\text{s}$)。

表 4-5 顯示於雙層矩形廠房個案的流量換氣率(ACH_R)結果(室內空間的體積 0.010 m^3)，此與單層矩形廠房結果(表 4-1)相較顯著偏低。此外，在三個來流水平風攻角的情況中，以 β 為 0° 時相應之流量換氣率最高，其次依序為 45° 與 -45° 的情況；此排序與單層矩形廠房的情況並不全然相同。

(a) 第一層樓：速度向量分佈(進風口半高處)



(b) 第一層樓：水平速度值分佈(進風口半高處)

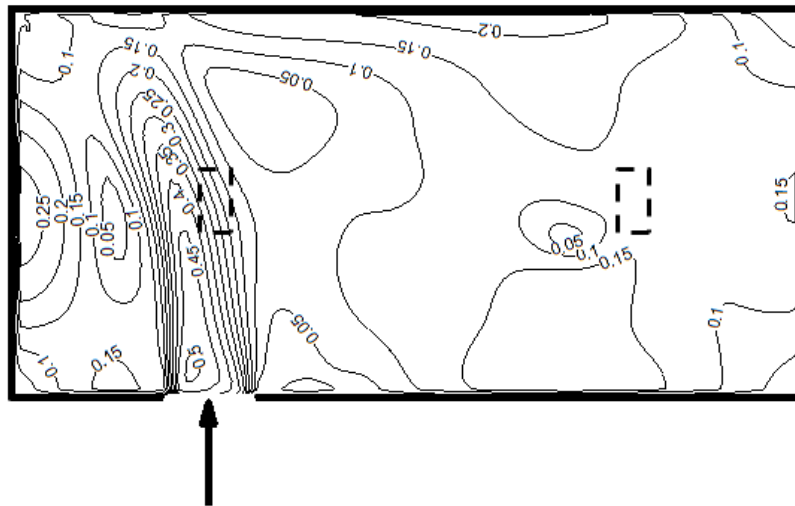
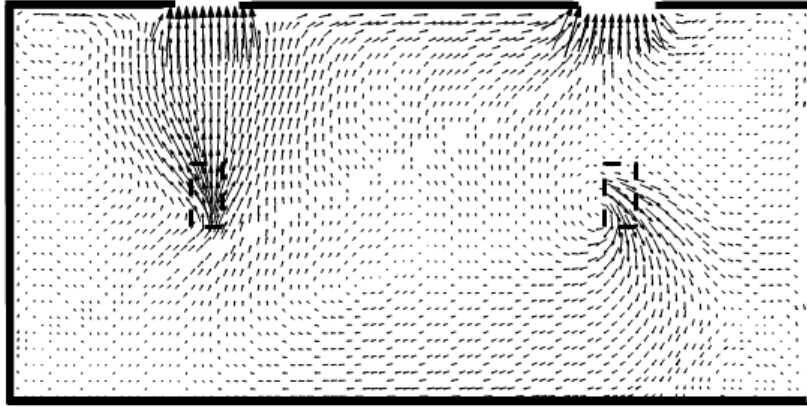


圖 4-37. 雙層矩形廠房處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$)

資料來源：本研究整理

(c) 第二層樓：速度向量分佈(出風口處)



(d) 第二層樓：水平速度值分佈(出風口處)

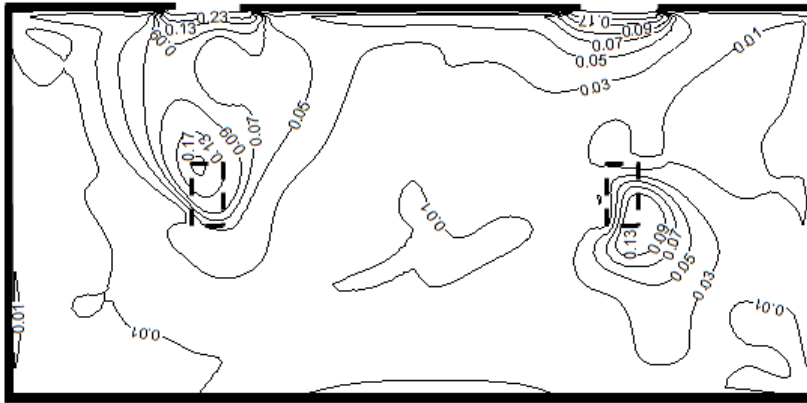
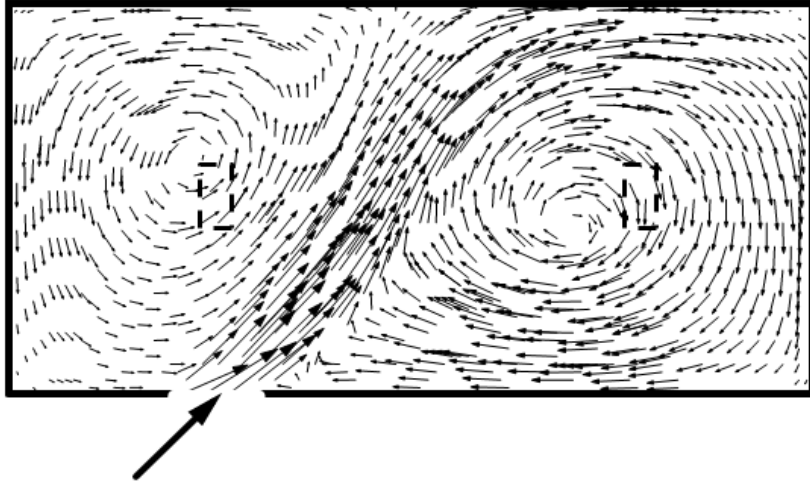


圖 4-37. 雙層矩形廠房處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$) (續)

資料來源：本研究整理

(a) 第一層樓：速度向量分佈(進風口半高處)



(b) 第一層樓：水平速度值分佈(進風口半高處)

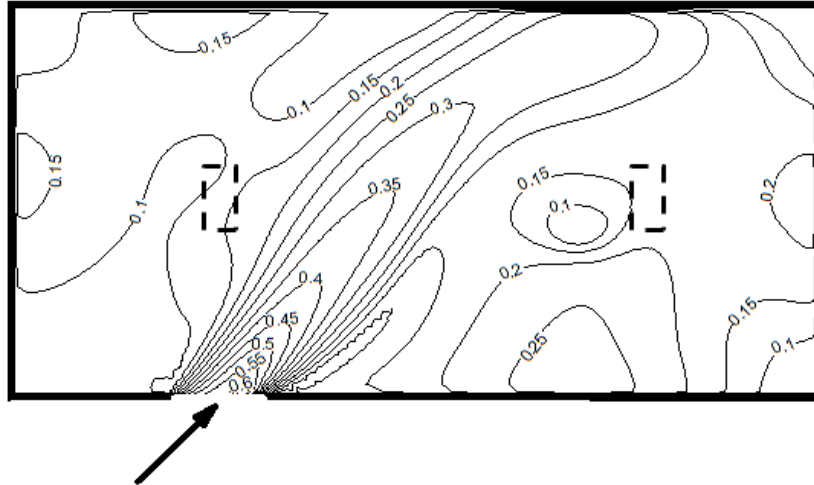
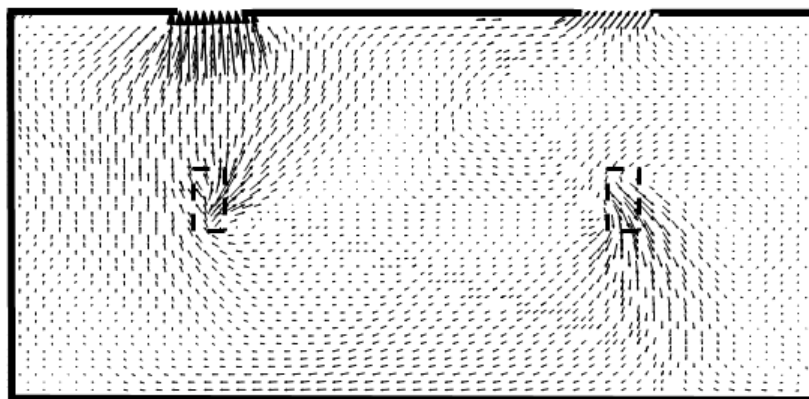


圖 4-38. 雙層矩形廠房處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=45^\circ$)

資料來源：本研究整理

(c) 第二層樓：速度向量分佈(出風口處)



(d) 第二層樓：水平速度值分佈(出風口處)

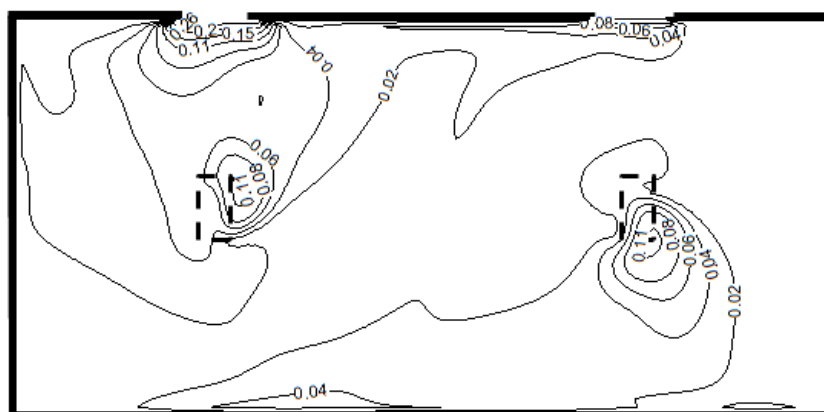
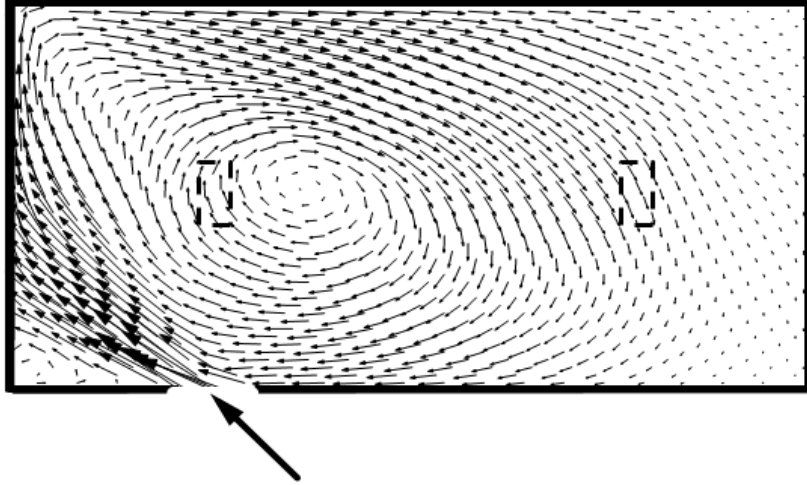


圖 4-38. 雙層矩形廠房處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=45^\circ$) (續)

資料來源：本研究整理

(a) 第一層樓：速度向量分佈(進風口半高處)



(b) 第一層樓：水平速度值分佈(進風口半高處)

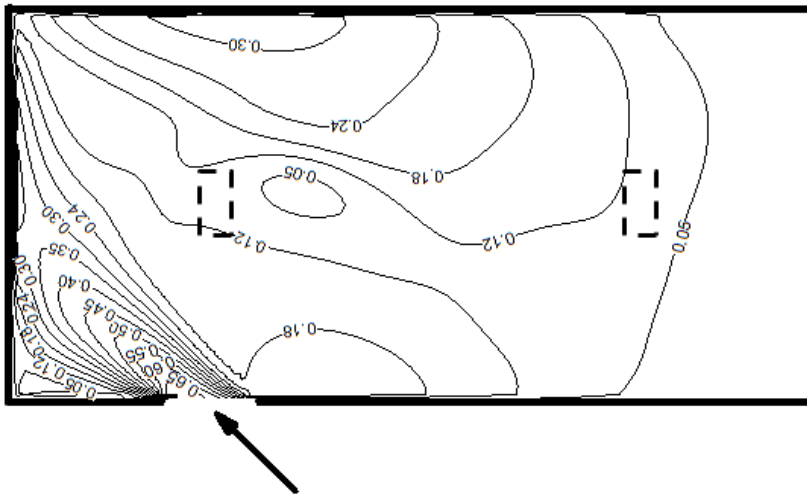
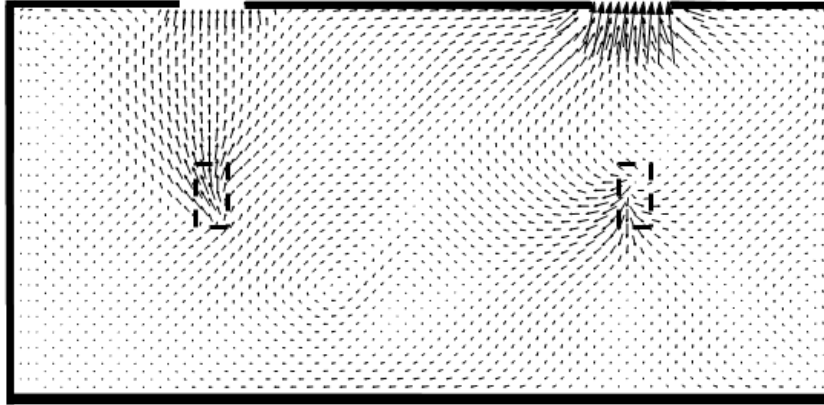


圖 4-39. 雙層矩形廠房處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=-45^\circ$)

資料來源：本研究整理

(c) 第二層樓：速度向量分佈(出風口處)



(d) 第二層樓：水平速度值分佈(出風口處)



圖 4-39. 雙層矩形廠房處水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=-45^\circ$) (續)

資料來源：本研究整理

表 4-5. 雙層矩形廠房模型個案流量換氣率比較表

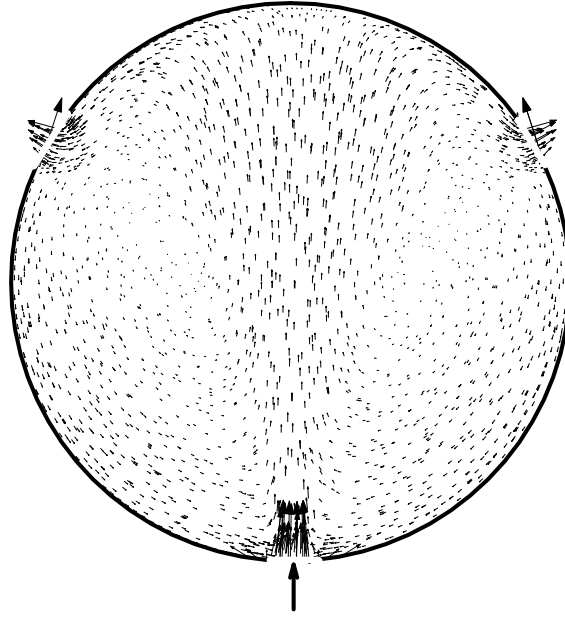
風攻角 β	ACH _R	
	(s ⁻¹)	(Hr ⁻¹)
0°	0.64	2304
45°	0.53	1908
-45°	0.47	1692

資料來源：本研究整理

三、圓頂集會場館情況

圖 4-40 至圖 4-42 顯示三個來流水平風攻角相應之圓頂集會場館水平面(距地面 14.5cm 高，即窗口的半高處)速度向量分佈與無因次水平速度等值圖。在 β 為 0°的情況(圖 4-40)中，氣流自進風口進入後產生了一個近於正向射流的流態，並於左、右兩側分別形成對稱之逆時針及順時針渦流，但因受兩側出風口的影響，其渦流之結構並不十分明顯。當 β 為 15°時(圖 4-41)，主流束左側逆時針渦流之幅員明顯增大，射流之主要流束有直接流向右側出風口之趨勢。而在 β 為增至 30°時(圖 4-42)，主流束偏轉之程度更劇，逆時針渦流幾乎涵蓋了整個幅員。

(a) 速度向量分佈(窗口半高處)



(b) 水平速度值分佈(窗口半高處)

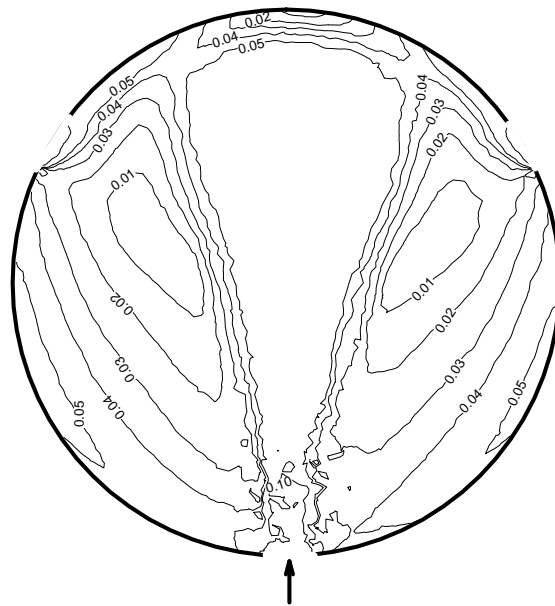
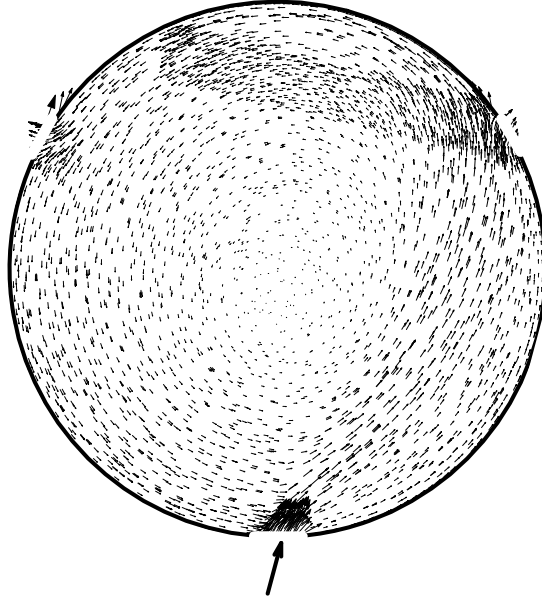


圖 4-40. 圓頂集會場館水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=0^\circ$)

資料來源：本研究整理

(a) 速度向量分佈(窗口半高處)



(b) 水平速度值分佈(窗口半高處)

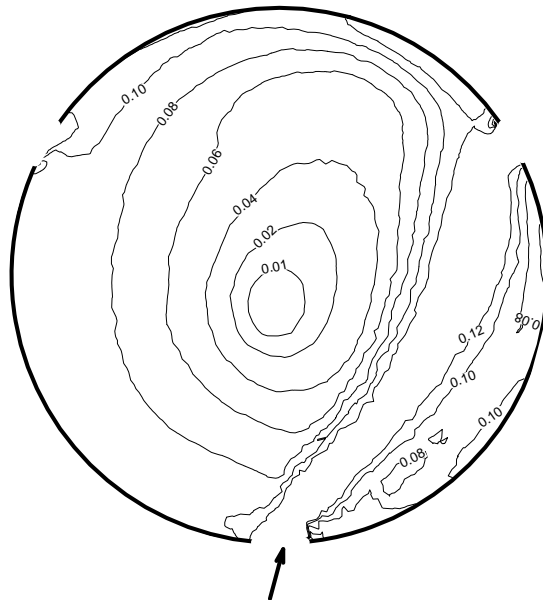
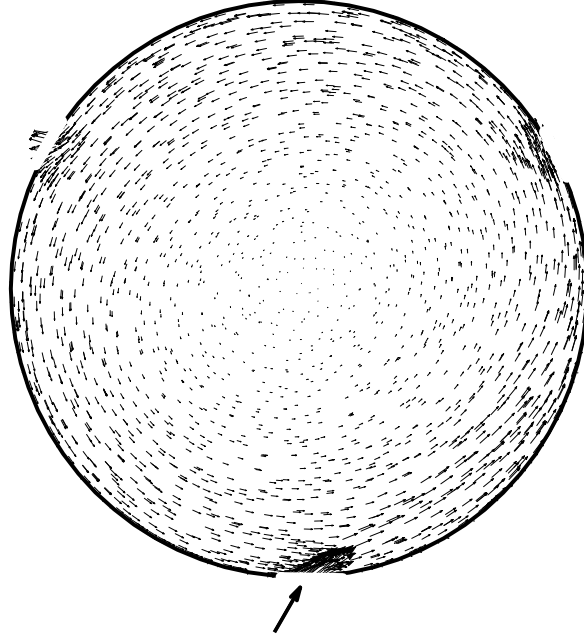


圖 4-41. 圓頂集會場館水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=15^\circ$)

資料來源：本研究整理

(a) 速度向量分佈(窗口半高處)



(b) 水平速度值分佈(窗口半高處)

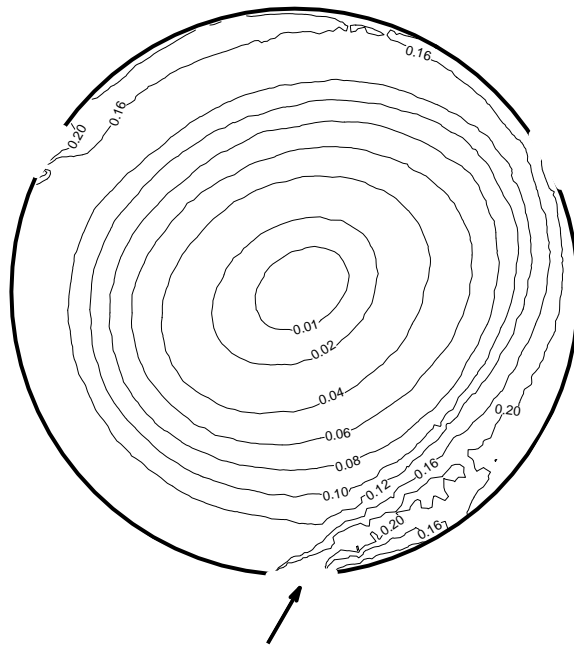


圖 4-42. 圓頂集會場館水平面速度向量與無因次水平速度等值圖($\beta=30^\circ$)

資料來源：本研究整理

第四節 室內通風分析與評估

待數值模式在氣流預測準確性確立後，本研究繼針對矩形廠房及圓頂集會場館之實際建築物(參見圖 1-1 與圖 1-2)，藉開口配置(包括進、出風口大小及位置)之改變，探討在高雷諾數情況下相應之通風效率。除了氣流場外，在數值分析個案中另加入了濃度場及溫度場的計算模擬，據以評估自然通風對室內污染物濃度與溫度之效果。

研究中採用了如後三個通風效率指標：

(1) 流量換氣率

於單位時間中，內外空氣置換至相當於建築室內體積空氣量的次數稱之為流量換氣率(air change rate)，定義如後：

$$ACH_R = \frac{Q}{V} \quad (4-5)$$

式中，Q 為流入室內空間的空氣流量，V 為建築物內部空間的體積。換氣率愈大代表建築內外空氣交換的頻次愈高，空氣流通量愈高。

(2) 濃度衰減率

研究中以室內全區具 100% 污染濃度而室外污染濃度為零作為初始情況進行氣流場與濃度場計算，以分析室內空間平均濃度隨時間衰減之情形。典型室內平均濃度與時間之變化關係如圖 4-43a 所示，若定義濃度衰減率為(C 為濃度)

$$ACH_C = -\frac{\ln C(t_1) - \ln C(t_0)}{t_1 - t_0} \quad (4-6)$$

則濃度衰減率呈固定值(參見圖 4-43b)。

(3) 溫度衰減率

類似於前者，在初始情況當室內與室外之溫度分別為 T_{OUT} 與 T_{IN} 時，典型室內平均溫度與時間之變化關係如圖 4-44a 所示，若定義溫度衰減率為(T 為溫度)

$$ACH_T = -\frac{\ln \frac{T(t_1) - T_{OUT}}{T(t_0) - T_{OUT}}}{t_1 - t_0} \quad (4-7)$$

則溫度衰減率呈固定值(參見圖 4-44b)。

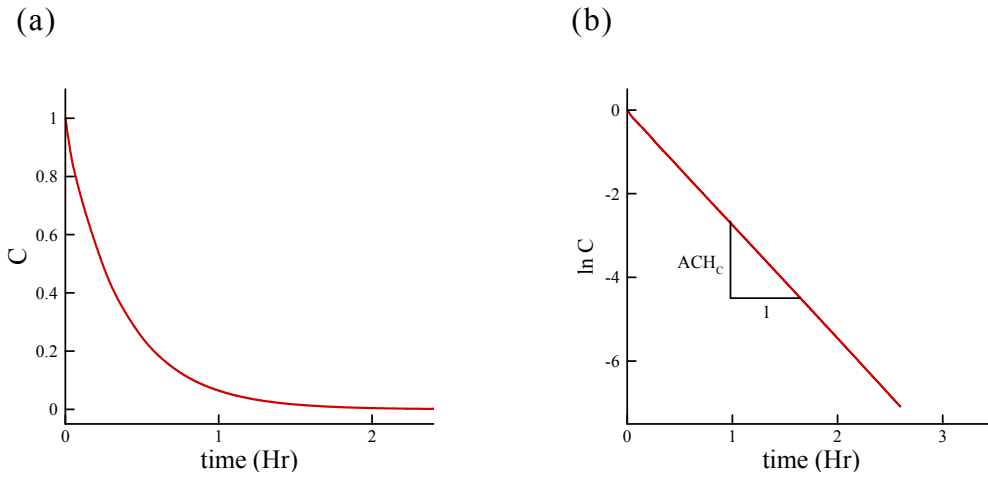


圖 4-43. 典型平均濃度隨時間衰減示意圖
資料來源：本研究整理

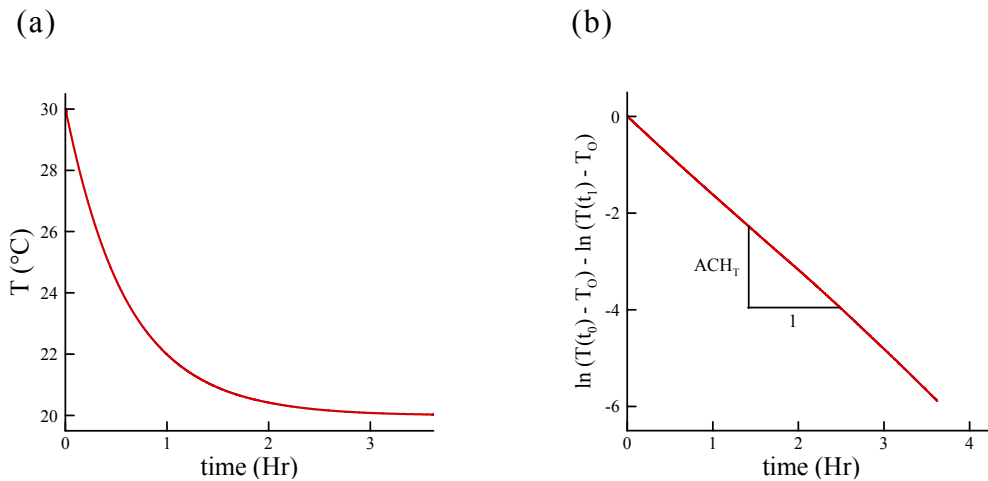


圖 4-44. 典型平均溫度隨時間衰減示意圖
資料來源：本研究整理

一、單層矩形廠房個案

數值模擬採用 1950m×800m×96m 之計算空間(阻塞比為 0.2%)，總網格數為 1510080 個，最小網格大小為 1m³。

(一)無窗、室內外無溫差情況

研究中針對 1A01 至 1A09(參見圖 4-45)等 9 種個案以進行室內外無溫差之氣流場與濃度場的計算模擬。在無窗之情況下，個案中進風口與出風口皆為自地面至高度 4m 處之門。依據數值模擬結果，表 4-6 顯示兩個通風效率指標(ACH_R與 ACH_C)之比較。

若以個案 1A01 為基準，和個案 1A02 與 1A05 之結果比較後得知，當進風口面積增為兩倍時，流量換氣率(ACH_R)則顯著地增加，且單一進風口(A1B5)相應之流量換氣率(10.18 Hr⁻¹)更較兩個進風口(A1B2)者(8.46 Hr⁻¹)為高。另一方面，若以濃度衰減率(ACH_C)來看，進風口面積之增加反而有負面之影響(自 2.73 Hr⁻¹ 分別減少至 2.03 Hr⁻¹ 與 1.63 Hr⁻¹)。此外，比較個案 1A01、1A03 與 1A06 之結果得知，當出風口面積增為兩倍時，流量換氣率(ACH_R)亦增加，但其顯著程度不如前者(進風口面積增加)情況。然而，若以濃度衰減率(ACH_C)來看，出風口面積之增加則有正面之影響。再者，比較個案 1A01 與 1A04 與 1A07 之結果得知，當進、出風口面積皆增為兩倍時，流量換氣率(ACH_R)與濃度衰減率(ACH_C)均大幅增加。

綜合前述結果得知，增加進、出風口面積能提昇流量換氣率，且增加進風口面積時較增加出風口面積更具功效。另在濃度衰減率的考量上，增加出風口面積亦可加速平均濃度之衰減，而增加進風口面積可能不利於室內濃度之降低。

比較個案 1A01、1A08 與 1A09 之結果得知，流量換氣率依大小排列依序 1A08(4.20 Hr⁻¹)、1A09(3.40 Hr⁻¹)與 1A01(3.34 Hr⁻¹)，而相應濃度衰減率之排序正好相反(分別為 1.12、1.72 與 2.73 Hr⁻¹)，顯示當室內主要氣流路徑愈短時，其相應之流量換氣率愈高，但濃度衰減率則有愈低之趨勢。

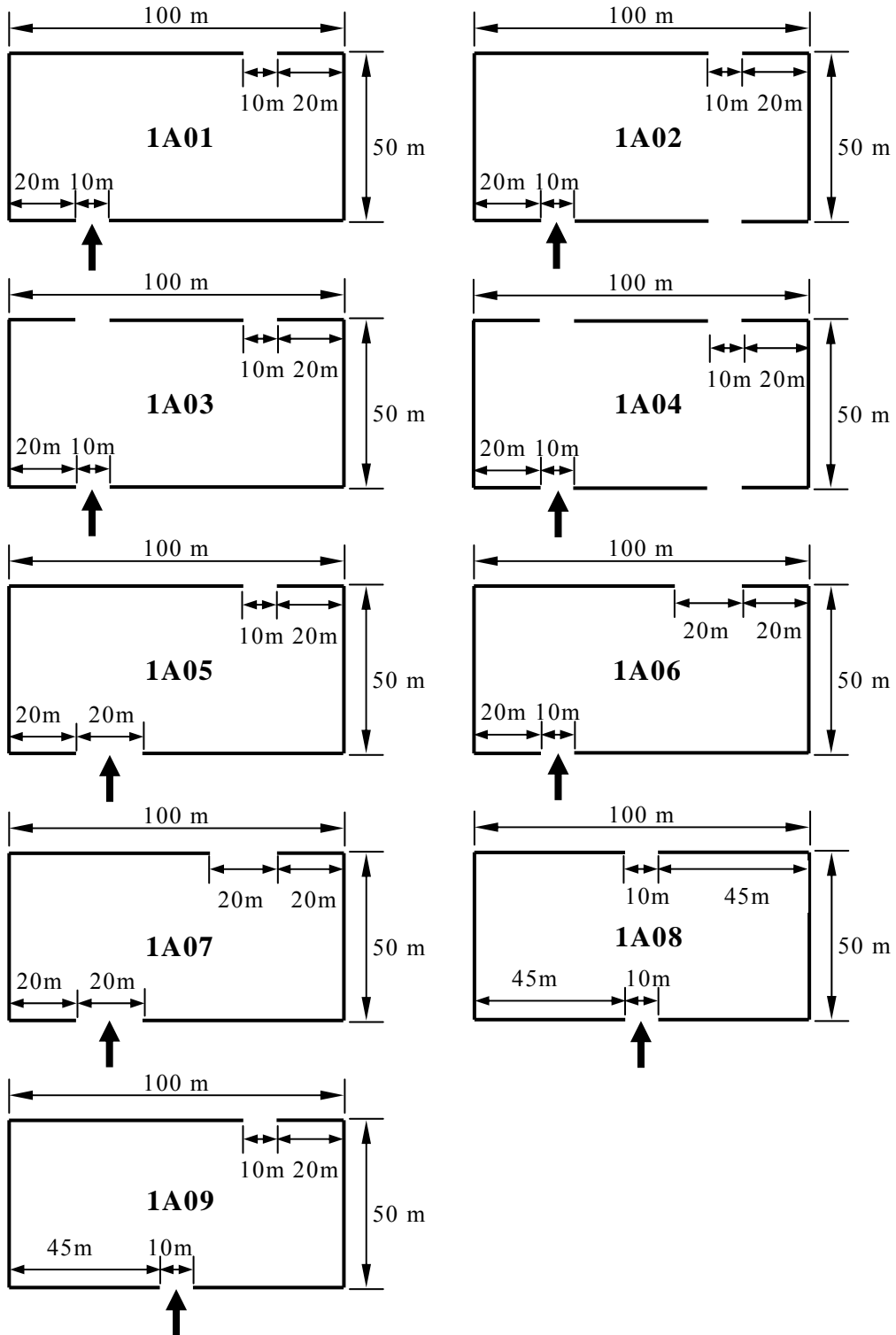


圖 4-45. 單層廠房(無窗)室內外無溫差數值模擬個案配置圖
資料來源：本研究整理

表 4-6. 單層廠房(無窗)室內外無溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH _R (Hr ⁻¹)	ACH _C (Hr ⁻¹)
1A01	3.34	2.73
1A02	8.46	2.03
1A03	4.62	3.76
1A04	14.56	4.09
1A05	10.18	1.63
1A06	5.28	3.91
1A07	17.51	3.90
1A08	4.20	1.12
1A09	3.40	1.72

資料來源：本研究整理

(二)無窗、室內外有溫差情況

研究中繼以個案 1A01 為基準分別進行三種不同室內外溫差的數值模擬(參見圖 4-46 示意圖),表 4-7 則顯示相關通風效率指標之比較。

由表中可見,在探討個案中當室內溫度高於室外時,因空間溫度差異引致之浮力效應對流量換氣率之影響極微,然濃度衰減率(ACH_C)有降低之勢。當室內外溫差同樣為 10°C 時,室內溫度為 40°C 者(1A01T3)之濃度衰減率(2.72 Hr⁻¹)較 30°C 室內溫度情況(2.52 Hr⁻¹)為高;但由溫度衰減率來看(分別為 2.87 與 3.03 Hr⁻¹),則有相反之趨勢。此外,比較 1A01T1 與 1A01T2 之個案結果顯示,室內外溫差愈大,溫度衰減率愈大,濃度衰減率則無明顯變化。

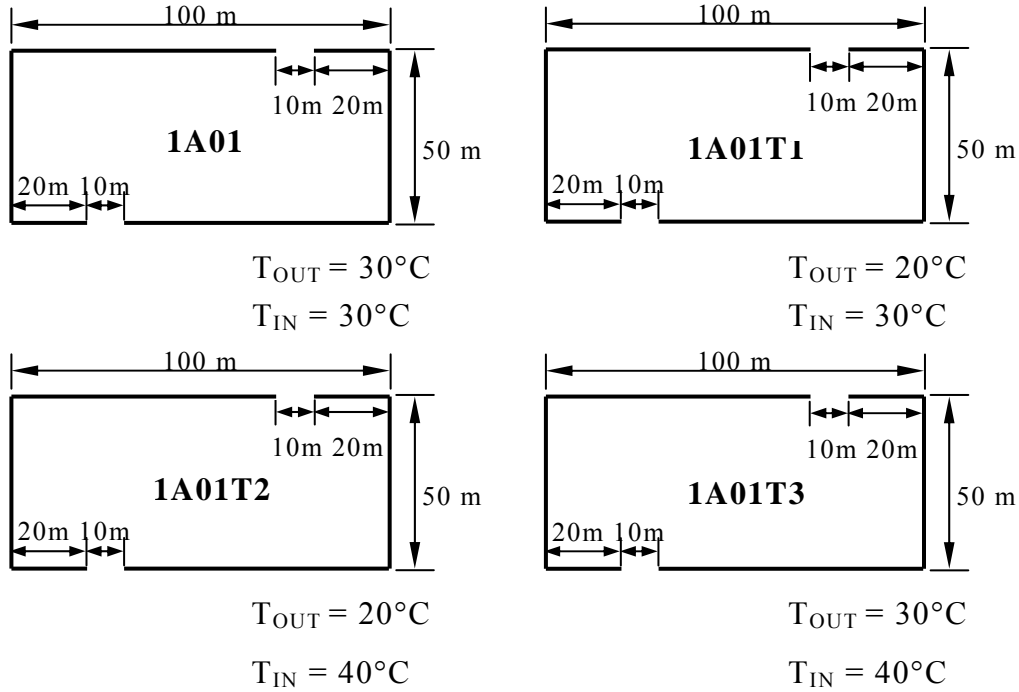


圖 4-46. 單層廠房(無窗)室內外有溫差數值模擬個案配置圖
資料來源：本研究整理

表 4-7. 單層廠房(無窗)室內外有溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH_R (Hr^{-1})	ACH_C (Hr^{-1})	ACH_T (Hr^{-1})
1A01	3.34	2.73	
1A01T1	3.33	2.52	3.03
1A01T2	3.35	2.51	3.12
1A01T3	3.32	2.72	2.87

資料來源：本研究整理

(三)有窗、室內外無溫差情況

研究中針對窗戶設置的情況乃以個案 1A01 中進、出風口為門的配置作為基準狀況(圖 4-47),另於距離地表 5m 至 7m 處增加了窗戶開口(窗戶高度為 2 公尺),圖 4-48 顯示 1A01C1 至 1A01C9 九種個案之窗戶位置。表 4-8 顯示室內外無溫差情況下相應之通風效率指標。

由個案 1A01、1A01C1 與 1A01C4 之結果得知,無論於迎風面或背風面增加了一個 4m 寬的窗戶使得流量換氣率增加(以增設於背風面增幅較大),亦使得濃度衰減率增加(以增設於迎風面增幅較大)。

比較個案 1A01、1A01C2 與 1A01C3 之結果可見,增加迎風面窗戶面積對流量換氣率與濃度衰減率皆有正面之貢獻,但窗戶之個數影響並不顯著。其中,另一方面,比較個案 1A01、1A01C5 與 1A01C6 之結果顯示,增加背風面窗戶面積對流量換氣率與濃度衰減率皆有正面之貢獻,且窗戶之個數影響並不顯著。

個案 1A01C4、1A01C5 及 1A01C6 係增加窗戶於背風面,分別為一倍面積開口於中央、兩倍面積開口於中央及兩個一倍面積開口於兩側。倘以 1A01 為基準,表 4-8 顯示當背風面增加窗戶開口時 ACH_R 隨著面積變大而升高(其中又以兩個開口的 1A01C6 較大)而 ACH_C 則小幅度提高。增加背風面窗戶開口與增加迎風面窗戶開口兩者相比, ACH_R 以前者的提升幅度較大,對 ACH_C 之影響則呈現相反的趨勢。

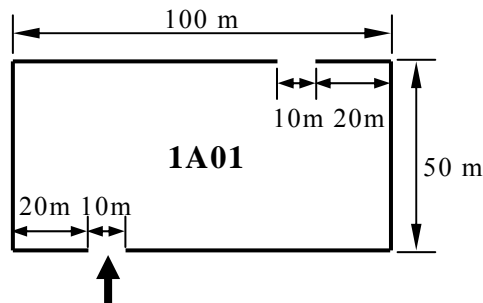


圖 4-47. 個案 1A01(無窗)配置圖
資料來源：本研究整理

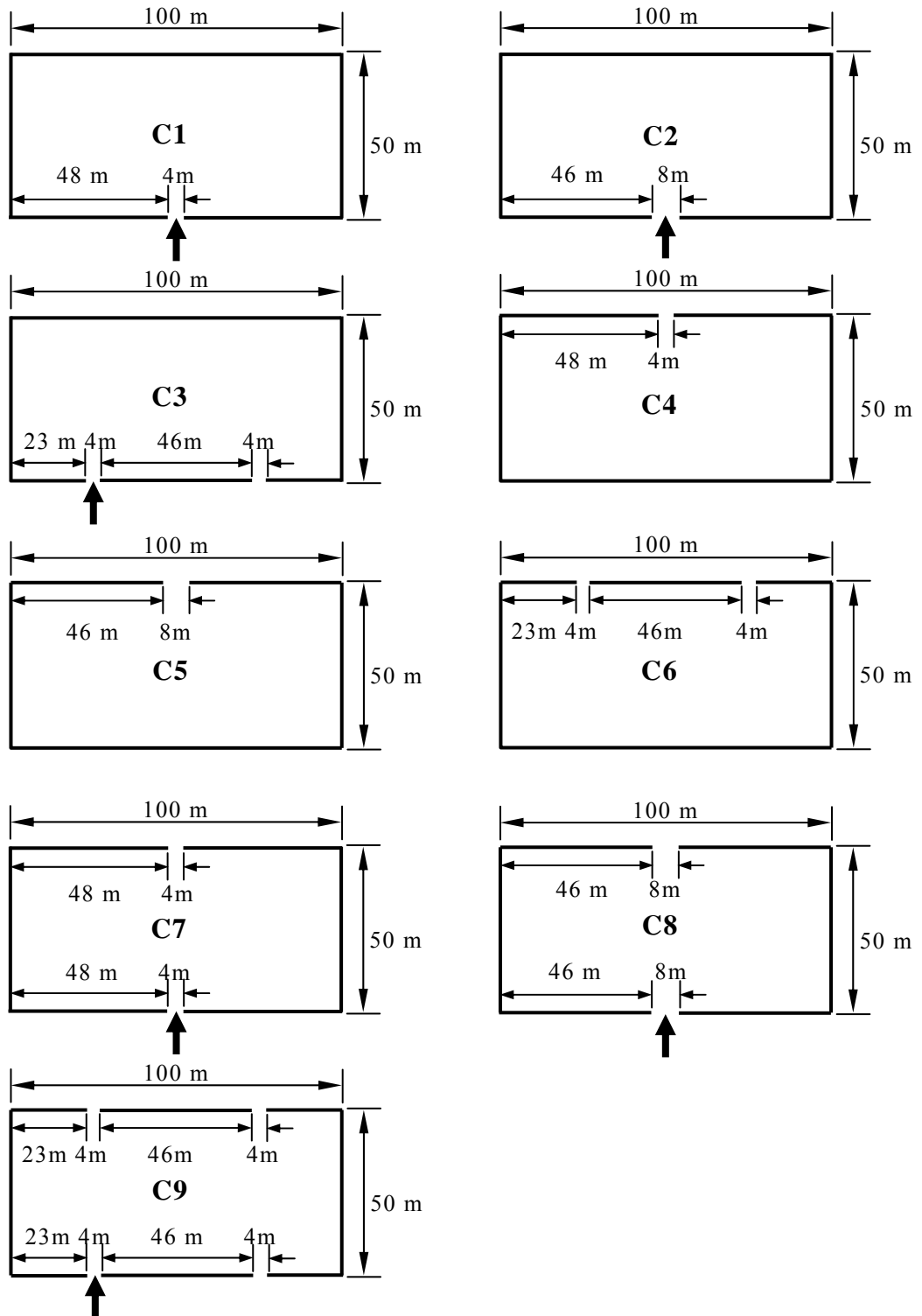


圖 4-48. 單層廠房(有窗)室內外無溫差數值模擬個案配置圖
資料來源：本研究整理

表 4-8. 單層廠房(有窗)室內外無溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH _R (Hr ⁻¹)	ACH _C (Hr ⁻¹)
1A01	3.34	2.73
1A01C1	3.53	3.05
1A01C2	3.67	3.08
1A01C3	3.71	3.06
1A01C4	3.65	2.86
1A01C5	3.92	2.88
1A01C6	4.03	3.37
1A01C7	3.93	3.25
1A01C8	4.56	3.22
1A01C9	4.60	2.48

資料來源：本研究整理

個案 1A01 C7、1A01C8 及 1A01C9 為迎風面及背風面皆增加相同窗戶配置開口，分別為一倍面積開口(4m 寬)於中央、兩倍面積開口於中央及兩倍面積開口置於兩側。若以個案 1A01 為基準，由表 4-8 可發現 ACH_R 隨面積變大而提升(其中以 1A01C9 最大)。迎風背風面同時增加窗戶開口與只於單一側增加窗戶開口相比，ACH_R 升幅最大。

二、雙層矩形廠房(參見圖 1-2)

數值模擬採用 1950m×800m×96m 之計算空間(阻塞比為 0.4%)，總網格數為 2104960 個，最小網格大小為 1m³。

(一)室內外無溫差情況

探討個案中一樓配置包括迎風面進風開口(自地面至 4m 高之門)與二樓背風面窗戶(距離地板 4m 至 6m 處)。研究中針對一樓四種進風開口配置(圖 4-49)與二樓六種出風開口配置(圖 4-50)進行數值模擬。依據數值模擬結果，表 4-9 列舉了 24 種個案相應之通風效率指標。

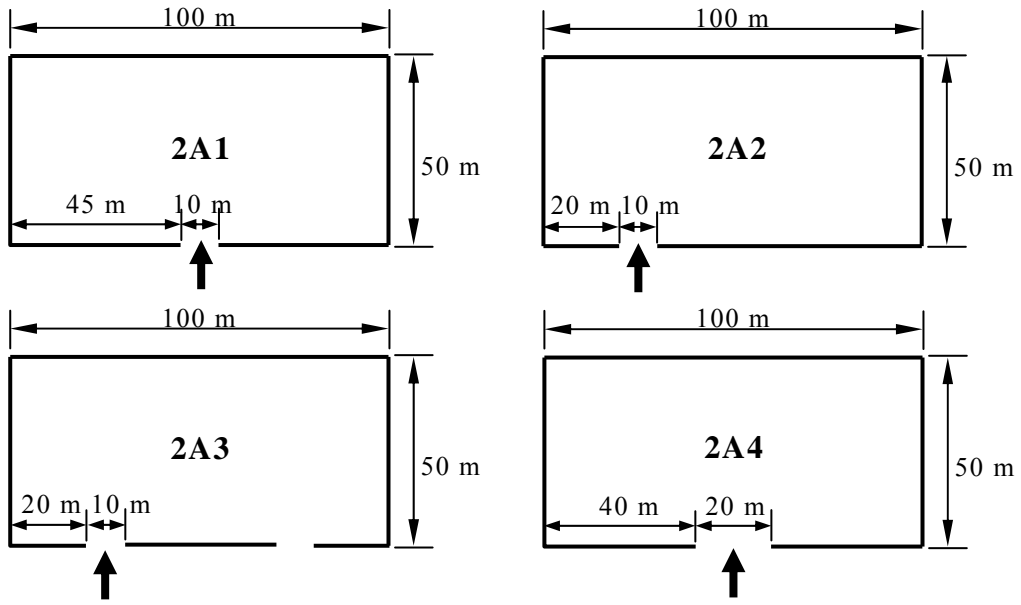


圖 4-49. 雙層廠房一樓室內外無溫差數值模擬個案配置圖
資料來源：本研究整理

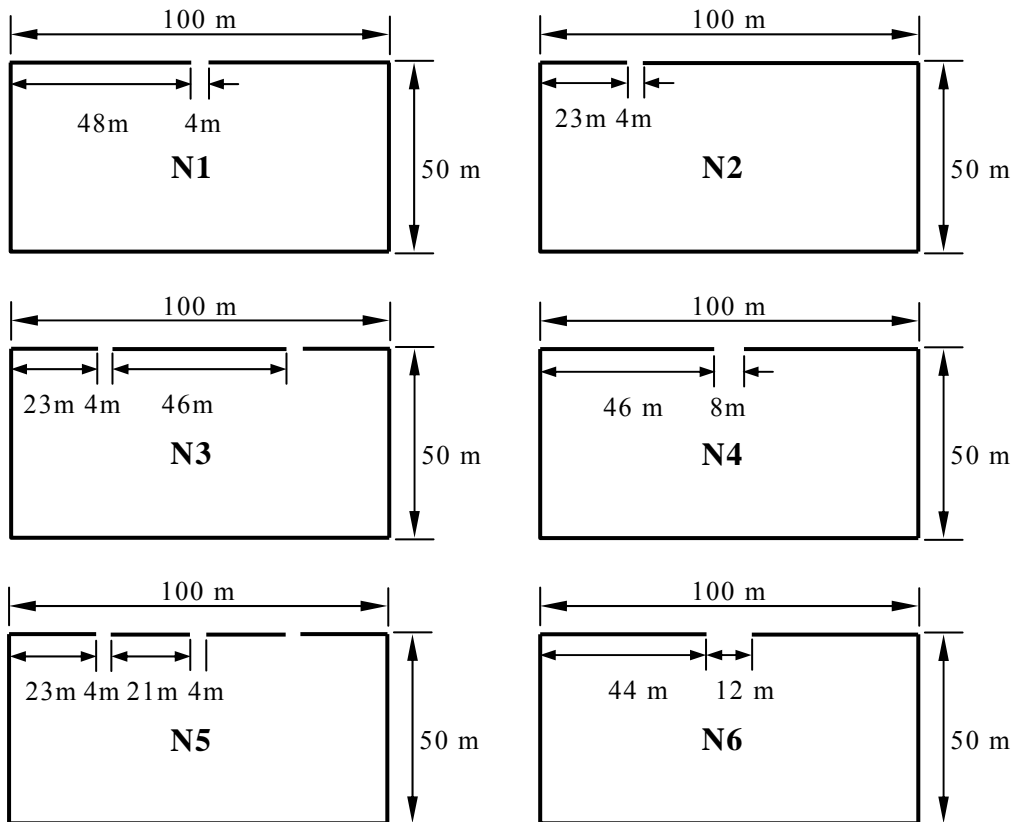


圖 4-50. 雙層廠房二樓內外無溫差數值模擬個案配置圖
資料來源：本研究整理

表 4-9. 雙層廠房室內外無溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH _R (Hr ⁻¹)	ACH _C (Hr ⁻¹)
2A1N1	0.88	0.90
2A1N2	0.90	0.90
2A1N3	1.62	1.71
2A1N4	1.61	1.30
2A1N5	2.14	2.30
2A1N6	2.15	2.07
2A2N1	0.86	0.76
2A2N2	0.89	0.74
2A2N3	1.65	1.42
2A2N4	1.61	1.72
2A2N5	2.15	2.23
2A2N6	2.17	2.09
2A3N1	0.86	0.95
2A3N2	0.88	0.78
2A3N3	1.69	1.52
2A3N4	1.67	1.43
2A3N5	2.35	1.98
2A3N6	2.36	1.82
2A4N1	0.88	0.73
2A4N2	0.90	0.86
2A4N3	1.72	1.57
2A4N4	1.71	1.62
2A4N5	2.34	2.38
2A4N6	2.36	2.35

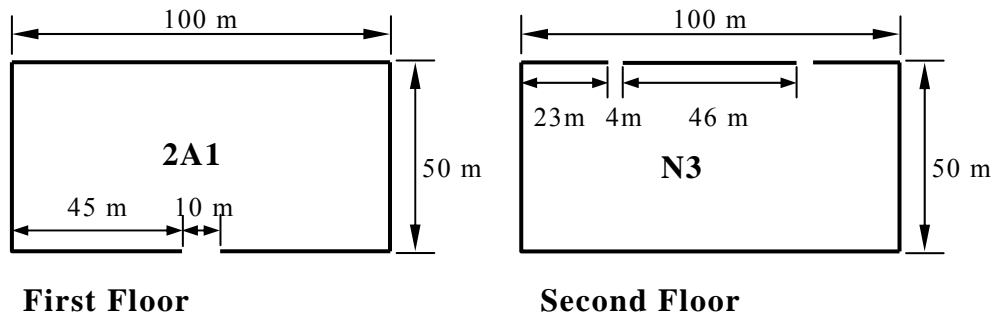
資料來源：本研究整理

比較 2A1N1 至 2A1N6 之結果得知，二樓窗戶之開口面積愈大，愈有利於流量換氣率之提昇，但流量換氣率與二樓窗戶開口位置之相關性並不高(類似的趨勢亦見於其他三種一樓配置之情形)。另一方面，二樓窗戶開口面積增加時亦對濃度衰減率有正面的貢獻。除了一樓為 A1 配置之情況外，濃度衰減率隨著二樓窗戶開口位置之改變則呈現不同之結果，其中尤以 2A1N5 之情況最高(2.30 Hr^{-1})。

若自另一個角度來看，當二樓窗戶之開口面積與配置固定時(以 2A1N1 至 2A4N1 比較為例)，一樓之開口配置對流量換氣率幾乎無影響(約為 0.87 Hr^{-1})，至於在濃度衰減率上，則以個案 2A3N1 為最高。類似的趨勢亦見於其他五種二樓配置之情形。

(二)室內外有溫差情況

研究中以雙層矩形廠房個案 2A1N3 為例，分別進行三種室內外溫差狀況之數值模擬(參見圖 4-51)，表 4-10 列舉出相關通風效率指標之比較。



$$2A1N3 : T_{OUT} = 30^{\circ}\text{C} , T_{IN} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$2A1N3T1 : T_{OUT} = 20^{\circ}\text{C} , T_{IN} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$2A1N3T2 : T_{OUT} = 20^{\circ}\text{C} , T_{IN} = 40^{\circ}\text{C}$$

$$2A1N3T3 : T_{OUT} = 30^{\circ}\text{C} , T_{IN} = 40^{\circ}\text{C}$$

圖 4-51. 雙層廠房室內外有溫差數值模擬個案配置圖

資料來源：本研究整理

表 4-10. 雙層廠房室內外有溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH _C (Hr ⁻¹)	ACH _T (Hr ⁻¹)
2A1N3	1.71	
2A1N3T1	1.47	1.63
2A1N3T2	1.65	1.70
2A1N3T3	1.45	1.77

資料來源：本研究整理

由表 5-5 可見，當室外溫度高於室內時時，濃度衰減率(ACH_C)反而呈現減少之趨勢(其中尤以兩個溫差為 10°C 者最為明顯)。至於在溫度衰減率(ACH_T)方面，以相應於室內整體平均溫度最高的 2A1N3T3 最大，2A1N3T2 次之，2A1N3T1 最小。此排序與單層矩形廠房的情況並不盡相同。

三、圓頂集會場館(參見圖 1-1)

數值模擬採用 1600m×1440m×240m 之計算空間(阻塞比為 1.9%)，總網格數為 1676307 個，最小網格大小為 0.0237m³。

針對圓頂集會場館之情況中，進出風口窗戶係於距離地面 28m 處沿著圓環外形牆壁設置(高度為 2m)。研究中針對 9 種通風開口配置進行室內外無溫差條件下之數值模擬，觀察於不同通風開口配置下其濃度衰減的狀況。其中，個案 D01 與 D02、D03 與 D04、D05 與 D06 分別為 1/6、2/6、3/6 窗戶開啟的情況，D07、D08 與 D09 則屬 4/6 窗戶開啟的情況。

表 4-11 列舉出 9 種個案在室內外無溫差情況下濃度衰減率之比較。一般趨勢顯示，當窗戶開啟面積愈大，濃度衰減率愈高；然當窗

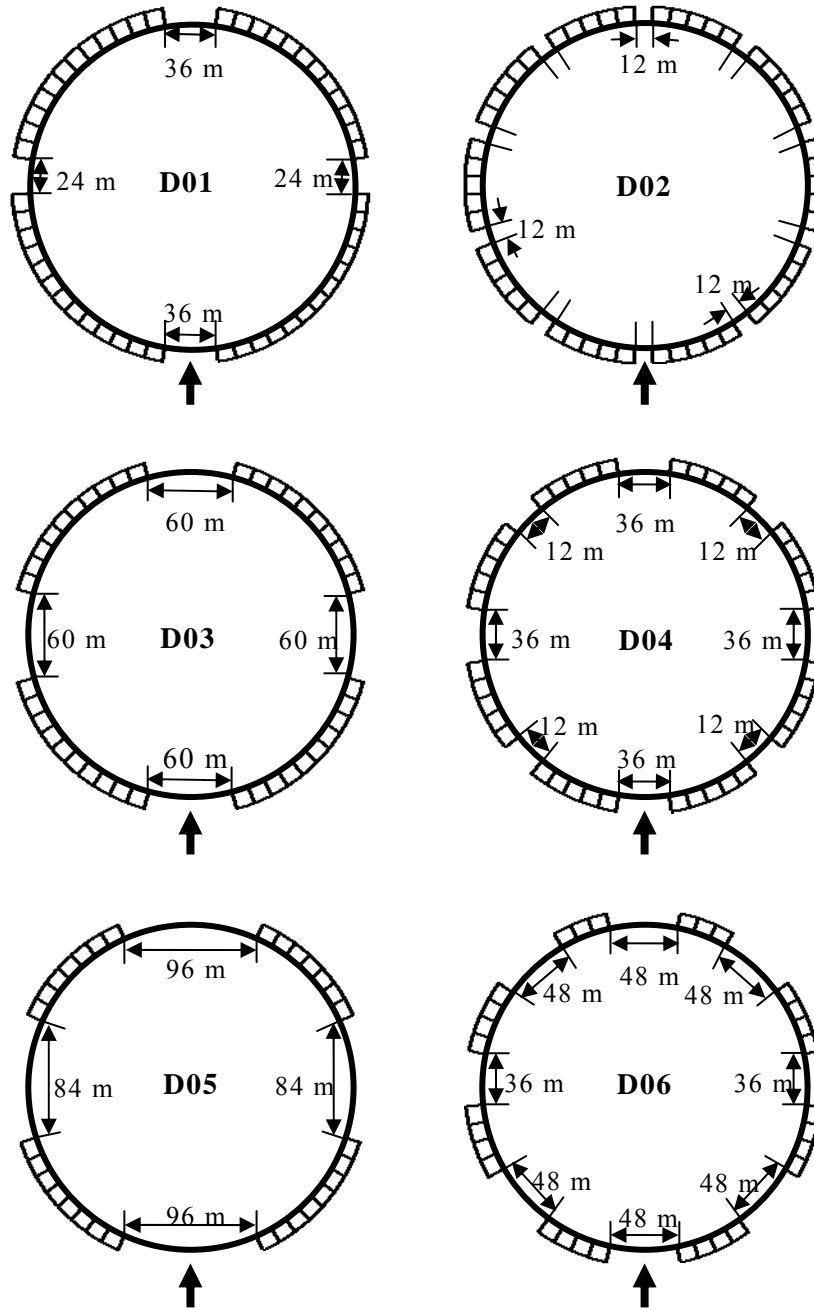


圖 4-52. 圓頂集會場館數值模擬個案配置圖

資料來源：本研究整理

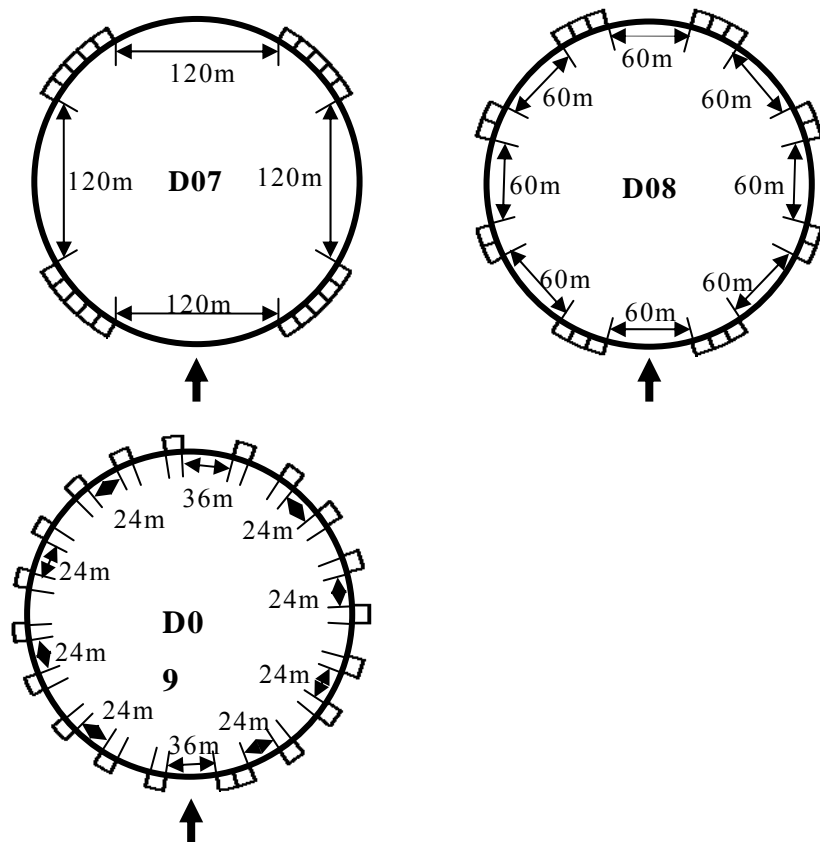


圖 4-52. 圓頂集會場館數值模擬個案配置圖(續)

資料來源：本研究整理

表 4-11. 圓頂集會場館室內外無溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH _c (Hr ⁻¹)
D01	0.42
D02	0.35
D03	0.74
D04	0.59
D05	1.05
D06	0.72
D07	1.29
D08	0.92
D09	1.13

資料來源：本研究整理

戶開啟面積固定而開窗數愈多時，濃度衰減率則降低，此與自矩形廠房獲得結果之趨勢並不相同。

當室內與室外溫度分別為 30°C 與 20°C 時，表 4-12 列舉出 9 種個案相應通風效率指標之比較。一般而言，因溫度差距引致之浮力效應助長了室內濃度與溫度混合之效果。在濃度衰減率方面，當窗戶開啟為 1/6 時，ACH_C 結果與無溫差時相近，然當窗戶開啟增大時，ACH_C 則明顯增大；然濃度衰減率仍呈現隨著開窗數之增加而降低之趨勢。另一方面，溫度差異對溫度衰減率之變化趨勢亦有類似的效果。

表 4-12. 圓頂集會場館室內外有溫差通風效率指標比較表

個案編號	ACH _C (Hr ⁻¹)	ACH _T (Hr ⁻¹)
D01	0.44	0.47
D02	0.33	0.32
D03	0.98	1.00
D04	0.85	0.85
D05	1.20	1.35
D06	1.08	1.07
D07	1.49	1.71
D08	1.45	1.39
D09	1.40	1.29

資料來源：本研究整理

第五章 研究成果與檢討

第一節 研究結果

茲針對目前已完成之成果，逐項分述如後：

一、文獻之收集與整理方面

1. 完成了國內外有關自然通風典型相關文獻與成果資料之初步收集與整理。
2. 自文獻中整理獲得的自然通風分析理論、方法與技術，以作為後計畫工作執行之重要參考。

二、風洞試驗方面

1. 完成了三個大型建築物 1/200 的縮尺模型(包括 1 個圓頂室內集會場館與 2 個矩形廠房)之模型製作，並執行了相關的風洞模型試驗量測。
2. 針對三個大型建築物的風洞模型試驗，獲得了在均勻來流、三個水平風攻角情況下，單層矩形廠房、雙層矩形廠房、圓頂室內集會場館相應之頂面平均內風壓係數與進出風口壓力差量測結果，作為數值模擬風場模擬驗證比對之依據。

三、數值模擬方面

1. 完成了 FLUENT 套裝軟體在進行室內通風模擬計算標準程序之建置。
2. 以前述風洞模型試驗情況為基準，平行地從事單層矩形廠房、雙層矩形廠房與圓頂室內集會場館情況之風場模擬。與試驗量測結果比對後得知，在建築頂面內風壓係數分佈與進出風口壓力差上，數值預測結果具有不錯之穩合度，驗證了本數值模式在風場預測上之可用性。
3. 針對單/雙層矩形廠房與圓頂室內集會場館等大型建築物之實際

情況進行高雷諾數下系統化之風場模擬，並進行濃度與溫度變化之數值計算。在通風評估的量化指標上，除了與相應於風場之通風率外，亦納入與濃度場、溫度場相關之濃度衰減率與溫度衰減率指標之探討。

三、綜合分析

整合系統化數值模擬結果，以通風評估量化指標為準，針對建築物開口之位置與大小對室內自然通風功效之影響進行探討，並分析因建築物內外部間之壓力與溫度差異對室內氣流造成影響之程度與機制，以獲得量化之整合結果，進而提供相關建築通風配置規劃與設計之重要參考。

四、專家諮詢

本研究業於 103 年 8 月 25 日進行了專家諮詢會議，獲得了專家對本研究之指導與建議(參見附錄三)。

第二節 問題檢討與對策

一、模型製作

在實際的情況中，矩形廠房與圓頂集會場館之室內或有另設隔間或附屬設備之情形，在探討上將大幅增加研究個案之複雜程度。考慮比較基礎之一致性，本研究中未考慮前述隔間與附屬設備等因素之影響，而針對室內為淨空的簡化情況進行探討，據以獲得通風評估在初步設計階段之參考通則。

二、模型製作

為了要確保模型體之剛度與表面之硬度，研究中模型之外壁係以 6 mm 之壓克力板製成。為了要量得模型頂面之內風壓，必須於頂面採用雙層壓克力板的設計以容納壓力管線之擺置。因此，在模型設計與製作時需審慎地考量與執行。

三、試驗來風形態

基於量測結果精度之考慮，風洞試驗中模型之阻塞比維持在 3% 以下。為便於與數值模擬結果比對之單純性，來風形態乃選擇為平滑 (smooth) 與均勻 (uniform) 者。

四、數值模擬之計算能量

研究中的數值工作涉及大量之電腦運算，需要足夠之電腦硬體支援。除了計算個案之數量多之外，在模式發展階段更需顧及電腦之運算速度，以爭取計畫進度之推動。

本研究中之數值模擬係著眼於在個人電腦之運算，以提昇模式在應用上之普遍性。為了要克服此問題，計畫中之數值模擬乃於六核心個人電腦 (I7-4930K 系列之中央處理器) 中進行，另內置了一個通用計算圖形處理器，配合以相對之平行處理，以加速推動數值工作進度之進行。

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究之主要目的係針對典型大型建築物(包括單、雙矩形廠房與圓頂室內集會場館)之自然通風問題，應用數值模擬的方法分析室內風場、濃度場與溫度場之變化，並以相關之量化指標評估其相應之通風成效，進而獲得相關通風配置規劃與設計之重要參考通則。

目前獲得的結論計有如後四項：

- 一、室內主要流束路徑之長短對通風效率優劣深具影響。一般趨勢顯示，主要流束路徑愈短，流量換氣率(ACH_R)愈高，濃度衰減率(ACH_C)愈低。
- 二、對單層矩形廠房而言，增加進、出風口面積能提昇流量換氣率，且增加進風口面積時較增加出風口面積更具功效。在濃度衰減率的考量上，增加出風口面積亦可加速室內平均濃度之衰減，但增加進風口面積未必有利於室內濃度之降低。至於在溫度衰減率方面，因空間溫度差異引致之浮力效應對流量換氣率之影響極微，然濃度衰減率(ACH_C)則有降低之勢。而當室內外溫差愈大時，溫度衰減率愈大。
- 三、在雙層矩形廠房情況中，二樓窗戶之開口面積愈大，愈有利於流量換氣率之提昇，但流量換氣率與二樓窗戶開口位置之相關性並不高。此外，二樓窗戶開口面積增加時亦對濃度衰減率有正面的貢獻。另一方面，當二樓窗戶之開口面積與配置固定時，一樓之開口配置對流量換氣率無明顯影響。至於當室內溫度高於室外時，溫度衰減率(ACH_T)以相應於室內整體平均溫度最高者最大。
- 四、針對圓頂室內集會場館情況，當窗戶開啟面積愈大，濃度衰減率

愈高；然當窗戶開啟面積固定而開窗數愈多時，濃度衰減率則降低。此外，因室內外溫度差距引致之浮力效應可助長室內濃度與溫度混合之效果。當窗戶開啟高於 $1/6$ 時，在室內外有溫差時濃度衰減率較無溫差情況明顯增大，且隨著窗戶開啟面積之增加而增加。另一方面，溫度差異對溫度衰減率之變化趨勢亦有類似的效果。

第二節 建議

本研究建議事項分述如後：

建議一

辦理本研究成果之推廣說明會：立即可行建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會、中華民國全國建築師公會、中華民國土木技師公會全國聯合會、中華民國結構工程技師公會全國聯合會

為使本計畫之研究成果能立即為大型建築物自然通風規劃與設計之應用，可以辦理本研究成果之推廣說明會。

建議二

增加應用數值模擬分析風工程相關研究課題：中長期建議

主辦單位：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會

除了以風洞模型試驗進行建築通風之研究外，在計算機軟/硬體大幅進步的現今，應用計算流體動力學之方法進行同樣的探討已臻成熟可行之際，本研究之執行即為一個實例。目前國際知名的大型風洞實驗室多配置有 CFD 實驗室或研究團隊，除在實驗上提供服務能量外，亦能配合數值計算以建立數值風洞的機制，在分析上達到相輔相成之功效。建議未來建研所風洞實驗室應作 CFD 實驗室或研究團隊建制之規劃並持續支持 CFD 之風工程相關研究，以更提昇其服務能力與層次。

附錄一 期中會議意見回覆

審 查 意 見	回 覆
一、陳瑞華委員：	
1. 建議建立合宜之通風成效指標 (考慮溫度與濃度)。	研究中採用之通風成效評估包括與風量、濃度與溫度衰減有關之三個指標 (ACH _R 、ACH _C 與 ACH _T)。
2. 以風洞試驗驗證數值模擬結果時，宜比對風速。	風洞模型試驗結果係作為數值模擬驗證之依據，而為了要突顯建築模型內風壓之變化趨勢，故採用較高之來流風速 (18.9 m/s)。待數值模擬之預測確認後，後續的流場模擬則針對實際建築物與來風情況(C 地況，地面高 4m 處風速為 2 m/s)進行系統化之通風探討。
3. 建物開口之配置是否典型？	本研究個案之尺寸與開口之配置係參照國內典型之矩形工業廠房及圓頂室內集會場館訂定，期藉系統化的通風模擬，據以探討通風設計之通則。
二、邱昌平委員：	
1. 以工業廠房及巨蛋型會館為對象，探討進風口及出風口(位置及大小)之安排對建築物自然通風之影響，以風洞試驗及 CFD 數值模擬方法比較兩種手法，目前結果尚屬良好。	謝謝委員之指教。
2. 壓克力板 6mm 厚，而出風口之	模型之剛度足夠，在風洞試驗中

<p>深只有 1cm，會否有 drag(拖曳力)之阻擾？</p>	<p>18.9 m/s 的風吹襲下不會產生引致量測誤差之變形。</p>
<p>3. pp.23~pp.25 中，”頂面”在何處，請標上，前視圖、後視圖中出風口、進風口之文字皆宜標示。”模型示意圖”→”模型尺寸圖”</p>	<p>依委員之建議修正。</p>
<p>4. 來流風速 18.9 m/s 約為風洞最高風速之半，若此最高風速為 10 m/s 或 2 m/s 以下，對自然通風有何影響？</p>	<p>風洞試驗係針對建築物剛性縮尺模型進行量測，主要在獲得數值模式結果驗證之比對依據。待數值模擬之預測確認後，後續的流場模擬則針對實際建築物與來風情況(C 地況，地面高 4m 處風速為 2 m/s)進行系統化之通風探討。</p>
<p>三、施邦築委員：</p>	
<p>1. 風洞試驗所用的風力相當強，建議以一般風力(接近自然風)驗證是否有差異，模型的深高比為 25:4，超過 6 倍，一般風力是否不易呈現通風效果。</p>	<p>風洞試驗係針對建築物剛性縮尺模型進行量測，主要在獲得數值模式結果驗證之比對依據。待數值模擬之預測確認後，後續的流場模擬則針對實際建築物與來風情況(C 地況，地面高 4m 處風速為 2 m/s)進行系統化之通風探討。</p>
<p>2. 單層廠房的進出風口接接近地面，與窗的型態不同，請說明此模型的理由，此模型是否常見的廠房？</p>	<p>本研究個案之尺寸與開口之配置係參照國內典型之矩形工業廠房及巨蛋型會館訂定，期藉系統化的通風模擬，據以探討通風設計之通則。</p>
<p>3. 房內若有大型機具，影響的趨勢如何？建議說明。</p>	<p>本研究期針對兩個典型的大型建築物，藉系統化的通風模擬，據以探討通風設計之通則。由於</p>

	是針對初步規劃設計階段，研究中暫不考慮室內相關之配置與設施之影響。
四、朱佳仁委員：	
1. 計算流體力學模式(CFD)的結果會受到計算域大小、計算網格、模式參數等的影響，報告中宜說明計算模式之設定參數。	依委員之建議辦理。
2. 計算域的阻礙比 (blockage ratio)為何？	數值模擬中相應之阻礙比分別約為 2%(單層廠房)、4%(雙層廠房)與 7%(圓頂室內集會場館)。此外，由於計算域的上邊界與左/右邊界具有可穿透且可滑動之屬性(即在截面垂直方向之變化為零梯度)，故建築物對順風向氣流影響之程度將更低。
3. 換氣率大多使用 ACH(Air change rate per hour)，表 4-1，4-2 可換成 ACH。	依委員之建議，將三個通風指標改為以小時。
五、楊勝德委員：	
1. 開口配置進出，應有 90°變換，不僅有直進直出的狀況。	謝謝委員之指教。
2. 風速不應大於 15m/s，應更低，更合於實務操作。	風洞試驗係針對建築物剛性縮尺模型進行量測，主要在獲得數值模式結果驗證之比對依據。待數值模擬之預測確認後，後續的流場模擬則針對實際建築物與來風情況(C地況，地面高 4m 處風速為 2 m/s)進行系統化之通風探討。

<p>3. 換氣率以通俗、人人易懂的每小時幾次來表達比較適合。</p>	<p>依委員之建議，將三個通風指標改為以小時計。</p>
<p>六、陳玠佑委員：</p>	
<p>1. 大型建築物應先予定義及適用範圍，以目前成果而言。</p>	<p>依委員之建議辦理。</p>
<p>2. 單層建築物之換氣率優於雙層建築物，並於簡報中補充說明單層建築物之濃度、效率、僅探討對開口寬度的變化，未來在通則探討時該如何呈現？</p>	<p>依委員意見作檢討修正。</p>
<p>3. 溫度與濃度的實驗內容為何？應補充之。</p>	<p>建研所風洞試驗室目前在濃度與溫度場量測上並無設備，尚無法進行。</p>
<p>七、陳建忠委員(主席)：</p>	
<p>1. 大型建築物有無隔間式，亦有多隔間式，廠房如在竹科，可能有需大面積，而在都市地區，可能是於大建築物內部分隔許多使用單元，其通風效率可能會有所不同。</p>	<p>謝謝委員之指教。</p>
<p>2. 建築物空間高度較高者，請考量其有效範圍。</p>	<p>依委員之建議辦理。</p>
<p>3. 有關協助本所人員自然通風分析能力，應是實驗前後的分析，無論是公式、計算流程、軟體都是可考量的，非僅限於CFD。</p>	<p>謝謝委員之指教。</p>

附錄二 期末會議意見回覆

審 查 意 見	回 覆
一、江維華委員：	
1. 本研究就兩類建築物(特別是廠房)建置建築物自然通風分析方法與程序，具高度參考價值。然巨蛋型建物相對較少，針對較小尺寸的場館可能意義較大，且需就剖面狀況做討論。	就學理而言，建築物大小之改變主要在於雷諾數效應以及因建築物高度改變而引致進風口入流流速剖面不同而產生之差異。因此，針對較小尺寸場館的情況，本研究之成果仍深具參考價值。
2. 建議本研究未來可加入內部流況的考量。	由於研究中探討之個案頗多，難以列舉所有情況之內部流況描述與分析，期盼未來能繼續獲得經費支援以進行更詳盡的探討。
3. 本研究可針對大尺寸建築物之特性做討論，另本研究通風設計與排煙有無關係？	在基本流況的考量上，大尺寸建築物之特性主要是高雷諾數的表現。如果雷諾數在 105 以上，其無因次結果應已達「高雷諾數不變性」的階段，本研究之成果應具代表性。 此外，本研究著重於初步通風設計與規劃相關通則之剖析，在室內濃度(煙)之探討上係以空間濃度平均值為比較之基準。若基於實際建築物個案之需要，未來研究中應採用更為緻密之數值模擬網格以解析出煙流之細部行為。
二、朱佳仁委員：	
1. 本研究分析建築物自然通風之氣流機制，應推廣以節約建築	此乃本研究之主要動機之一。

耗能。	
2. 本研究詳細列出 FLUENT 計算軟體的使用方法，有助於未來使用 FLUENT 的研究者。	在報告第四章第一節中詳細描述 Fluent 軟體各步驟之設定說明以利未來類似問題數值模擬之執行，此乃本研究主要目的之一。
3. 大型場館與廠房，因使用人多，或有工業通風、環安的需求，多採用機械通風。而住宅適用自然通風，故本研究可推廣至住宅式建築。	此與本研究之目標一致。
4. 建築物迎風面、背風面各有一個開口，貫流通風 (cross ventilation) 有理論公式可預測通風量，建議可和 CFD 計算的通風量 Q 比較。	依委員之建議，於期末報告中進行內容之增補。
三、邱英浩委員：	
1. 本研究建議可將實驗及計算之方式詳細說明，整個過程將有利於後續研究之進行。例如於 CFD 中流量、濃度之計算數據區域。	依委員之建議，於期末報告中進行內容之增補。
2. 建議後續研究中可以加強 CFD 計算之可信賴度分析，如 turbulence models、grid dependency、calculation domain(計算域)... 等等。	期盼未來能繼續獲得經費支援以進行更詳盡的探討。

<p>3. 溫度差之設定可詳細說明，若是直接設定溫度是否為合宜之方法，會不會與實際情形不符，建議可檢核計算後之溫度場結果。</p>	<p>本研究著重於初步通風設計與規劃相關通則之剖析，在探討溫差效應上乃以室內空間溫度平均值為比較之基準，據以評估通風效率。未來後續之研究可依委員之建議，再作細部之分析。</p>
<p>4. 建議未來可以比較 CFD 和風洞試驗建物外殼靜壓力及室內地板之靜壓力。</p>	<p>基於模型製作在技術層次之困難度，建物外殼靜壓力及室內地板靜壓力之量度在壓力管線之埋設上有影響室內氣流場之虞。在兼顧試驗結果準確度之考量下，本研究僅能針對模型頂面之內部風壓進行埋管與量測，並配合以進/出風口之壓力差結果，應足以作為數值模擬結果驗證之依據。</p>
<p>5. 實驗參數可以加以整理，建議未來可以用比例變化來說明。</p>	<p>謝謝委員之建議，將參照辦理。</p>
<p>四、陳啟中委員：</p>	
<p>1. 本研究後續應可建立單邊開口進出之模式，比較接近臺北市多數建築物之特性。</p>	<p>建研所在前幾年的相關通風研究中有針對類似建築物開口模式之研究成果可供設計之參考，而本研究則著重於初步通風設計與規劃相關通則之剖析。</p>
<p>2. 建議濃度定義與溫度之(內外空間)混合效應及邊界效應可更加詳細說明。</p>	<p>謝謝委員之建議，將參照辦理。</p>
<p>五、李鎮宏主任：</p>	
<p>1. 依建築技術規則採自然通風設計時，其門窗開口面積至少需</p>	<p>研究中風洞試驗係於低雷諾數情況下進行，主要在提供數值模</p>

<p>達該層樓地板面積之 5%。如進出口全開，此時之換氣率文獻提及可達約 1.5 ACH_R，本案廠房之實驗值大部分皆可符合，惟需注意風洞實驗高雷諾數與自然通風低雷諾數下的影響。</p>	<p>擬方法正確性之比對依據。待數值模式確立，後續之系統化數值模擬則是針對真實情況實體建築物之通風探討。</p>
<p>2. 有溫差效應之分析結果，其換氣率並無明顯提升，可能因溫度沿高度方向之梯度分佈未加以考慮，而讓下層較冷空氣無法順利補氣所造成，請研究團隊再行檢視。</p>	<p>一般而言，浮力通風顯現之功效多見於高樓建築，本研究之探討個案應屬低高寬比建築務，低溫進風氣流之密度較大，未必有利於垂直向的濃度混合與傳輸。</p>
<p>3. 依報告結論流速路徑越短其 ACH_R 越高、ACH_C 越低，可否以該二參數來探討其最適流速路徑，供自然通風設計時進出口相對位置之參考。</p>	<p>在建築物室內濃度與溫度容許之上限值明確時，將 ACHR 與 ACHC 之組合作最佳化是可行的。由於本研究主要著眼於一般通則之探求，在容許上限值並不明確之情況下尚無法執行。</p>
<p>六、蔡宜中副研究員：</p>	
<p>1. 本研究第六章「結論與建議」之建議部分，希望能增加「立即可行建議」，方能提昇本研究自然通風分析對工程與產業界之幫助。</p>	<p>將參照建議辦理。</p>
<p>2. 本研究成果建議協辦機關可增加諸如結構技師公會、土木技師公會、台灣建築中心等，以擴大其應用面。</p>	<p>將參照建議辦理。</p>

<p>3. 本研究「摘要」處請增加「四、主要建議事項」，後續亦請按部頒格式完成成果報告，相關圖示及文字錯誤疏漏處也建請一併修正。</p>	<p>將參照建議辦理。</p>
<p>七、陳玠佑副研究員：</p>	
<p>1. 選用 FLUENT 模型時，採用 UDF 程式編寫所能影響結果與確定性甚大，請研究團隊能將其技術轉移或教導給本所以利應用。</p>	<p>基於實際之需求，本研究團隊定當配合辦理。</p>
<p>2. 本研究開口皆位於長向配置，對於開口尺寸寬影響通風效率之值，能否提出具體廠房設計量化參考建議？如多少面積下，有幾個開口？尺寸為何？提供相關數據可利於廠房之自然通風節能設計。</p>	<p>將參照建議，就研究中之個案結果作整合分析。</p>
<p>八、陳建忠組長：</p>	
<p>1. 請提供本所(實驗室)有關以數值分析的各種模型、參數、經驗值，以及面對需要或不需要實驗的標的物，如何進行分析？其流程如何？何時適用數值模擬，何時才須進行風洞試驗？</p>	<p>依委員之建議，於報告中進行內容增補。</p>
<p>2. 自然通風的需求細項為何？以本研究而言，哪些空間已經使室內發生不適溫度或有足以危及健康情況下之空氣品質？可否列出其不舒適的評</p>	<p>為維護室內空氣品質與確保人員與舒適度與健康，研究中以濃度與溫度通風指標(ACH_C 與 ACH_T)作為評估之基準，以反映出在室內發生不適溫度或有足以危及健康廢氣情況下空氣品</p>

<p>估準則。</p>	<p>質回復之速率。在以獲得室內通風設計準則之主要目標下，本研究礙於工作量與執行期程之限制，尚無法作細部之討論。期盼未來能繼續獲得經費支援以進行更詳盡的研究。</p>
<p>九、邱昌平顧問：(書面審查)</p>	
<p>1. 本研究以單層、雙層矩形廠房(阻塞比各為 0.2% 及 0.4%)，及一個圓頂室內集會場館(阻塞比為 1.5%)，以縮尺模型進行風洞試驗(各有 3 個水平風攻角)。另以 FLUENT 軟體做數值模擬分析。兩者結果之比較相當吻合後，進一步做室內通風分析與評估，獲致一些相當有用的資料。</p>	<p>謝謝委員之肯定。</p>
<p>2. 本研究建議加強 CFD 實驗室或研究團隊之設置，宜予重視並推動。</p>	<p>本研就已將委員之意見納入成果報告之建議。</p>
<p>九、陳瑞華委員：(書面審查)</p>	
<p>1. 本研究以 CFD 探討自然通風問題，不僅確認 CFD 之可行性，也對大型建物之自然通風有重要發現。</p>	<p>謝謝委員之肯定。</p>
<p>2. 建議在結論中簡要說明 CFD 與風洞試驗結果之比較及 CFD 執行之注意事項。</p>	<p>依委員之建議，於報告中進行內容增補。</p>

附錄三 專家諮詢會議意見回覆

內政部建築研究所委辦計畫專家諮詢會議

計畫名稱：大型建築物自然通風之分析研究

日期：103年8月25日(10:30-12:00)

地點：內政部建築研究所

主持人：陳建忠 組長

出席人員：

內政部建築研究所	蔡宜中 副研究員	<u>蔡宜中</u>
淡江大學	張正興 教授	<u>(請假)</u>
中華大學	林文欽 教授	<u>林文欽</u>
建國科技大學	陳若華 教授	<u>陳若華</u>
虎尾科技大學	梁大慶 教授	<u>梁大慶</u>
淡江大學	羅元隆 教授	<u>羅元隆</u>
台北市建築師公會	黃秀莊 理事長	<u>黃秀莊</u>
建築技術學會	鄭讚慶 理事長	<u>鄭讚慶</u>
國家發展委員會住都處	黃劍虹 技正	<u>黃劍虹</u>
台北市政府建管處	段文龍 技正	<u>段文龍</u>
中興大學	方富民	<u>方富民</u>
成功大學	賴啟銘 教授	<u>(請假)</u>

委員	審查委員意見	廠商回應
<p>台北市建築師公會 黃秀莊理事長</p>	<p>1. 建築物開口之大小影響到通風的效率與濃度跟溫度的衰減，但是開口的大小也會影響到建築物之節能，開口大耗能大，開口小則較節能，與通風效率兩者可能正好相反，該如何拿捏？</p>	<p>誠如委員所述，若納入日照之幅射，開口大小的效應洽與本研究呈現之趨勢相反。然本研究目前並未考慮日照幅射之影響，現階段僅就氣流場之機制作考量，期盼未來能有計畫之支援針對此議題再作進一步的評估與分析。</p>
<p>中華大學 林文欽教授</p>	<p>1. 前面實驗部分有作出建築開口部分的壓力差，在數值模擬使用時應該把壓力差用的是多少列出來。</p>	<p>本研究中之氣流數值模擬係在室內與室外同時考量的情況下進行，進/出風口之壓力差為非恆定者，並非採用固定壓力差壓力條件的方式。</p>
	<p>2. 建議濃度衰減率及溫度衰減率的公式可採用一般共同的方式(例如：$T(t_1)-T(t_0)$)，最後再加一個負號。</p>	<p>依委員的建議修正。</p>
<p>建築技術學會 鄭讚慶理事長</p>	<p>1. 本研究結果，對建築物設計開門、開窗位置會有指導性功能，對土木工程如雪山隧道的通風換氣率及濃度衰減的掌握一定會有強烈的貢獻度。</p>	<p>謝謝委員之肯定。</p>
	<p>2. 本研究以工廠及大型建築物做模擬，如經費人力充沛，是否考慮地下室之自然通風，可立即改善各大樓地下室停車場或賣場之穢空氣。</p>	<p>基於計畫經費與期程之限制，本研究之預設個案目前並未包括地下室自然通風之考量，期盼未來能有計畫之支援針對此議題再作進一步的評估與分析。</p>
	<p>3. 以樓梯當作大樓自然通風豎井，實為創見。</p>	<p>如委員所述，研究中雙層廠房情況中樓梯口確實有類似坑道通風豎井之效能</p>

	4. 後續研究若能以自然通風與建築物大樓的外牆斷熱一起研究，對社會更有貢獻度。	期盼未來能有計畫之支援針對此議題再作進一步的評估與分析。
淡江大學 羅元隆教授	1. 不同指標做出來的結果並不相同，如何判定優先順序？	研究中所採用的三個指標(通風率、濃度衰減率與溫度衰減率)在通風之考量上各具其實質意義，端視在實際情況中考量之重點需求而異。
	2. 通風效率受到影響之因素很多，很複雜，需進行更全面性的分析、評估。	誠如委員所述，通風效率評估之因素確實複雜，本研究則專注在一般通則之探討，以作為通風初步設計規劃階段之參考。
	3. 進行實驗時，在進入設計階段，需去考慮其準確度影響範圍到底是多大，而在數值模擬方面是不是有這方面的問題。	無論是實驗或數值模擬，在分析評估時都應具有相當之準確度，以獲得正確之結論。
虎尾科技大學 梁大慶教授	1. 建議對包括開窗、開門的進風口及出風口面積比率及入流攻角狀況，配合現有案例之數據(ACH _R 、ACH _C)綜合整理成一個對照表，以提供設計建築物之參考。	於期末報告中將依委員的建議進行增補。
	2. 3D 的 CDF 已經是國內獨步專業研究，以前都還是 2D。本研究非常有意義。綜合考量實際需求，效果佳且準確、有效。	謝謝委員之肯定。
	3. 換氣率以通俗、人人易懂的每小時幾次來表達比較適合。	依委員的建議修正。

建國科技大學 陳若華教授	1. 本研究利用 CFD 技術充分探討在不同開口條件下對室內通風效率的影響，成果豐碩甚具實用價值。此外，本研究利用濃度場比較通風效率對比單純風量比較，甚具啟發性。	謝謝委員之肯定。
	2. 驗證 CFD 所作之實驗中，廠房內風壓係數量測之設置，可補充說明。	於期末報告中將依委員的建議進行增補。
	3. 雙層廠房之 CDF 計算時，是否內外風場均做計算？	本研究中之氣流數值模擬係在室內與室外同時考量的情況下進行。因此，進/出風口之壓力差為非恆定者
台北市政府 建管處 段文隆技正	1. 報告的內容印證了一些我們只知其然而不知其所以然的一些東西，這個報告基本上對我們在實務執行的解釋上面將來會有所幫助。	謝謝委員之肯定。
國發會住都處 黃劍虹技正	1. 通風分析研究與節能、舒適度、人體健康(汙染微粒子)習習相關，本研究有其重要性，方老師研究有其專業性，本會予以支持。	謝謝委員之肯定。
	2. 緣起部分，可檢討目前建築物之封閉性之缺點(防盜、節能考量)，缺乏自然通風的部分，以凸顯本研究的意義。	於期末報告中將依委員的建議進行增補。

	<p>3. 通案開口數及大小如何平衡拿捏，建議有機會再深入研究。</p>	<p>基於計畫經費與期程之限制，本研究目前尚難以針對開口數及大小之平衡作全面性的檢討，期盼未來能有計畫之支援針對此議題再作進一步的評估與分析。</p>
	<p>4. 研究方法中實驗及CFD的使用上如何取捨，建議於報告中增加兩者優缺點之比較。</p>	<p>於期末報告中將依委員的建議進行增補。</p>
<p>建研所 蔡宜中副研究員</p>	<p>1. 能否提供個案之計算軟體以供通風模擬計算？</p>	<p>研究中通風模擬採用FLUENT商用套裝軟體，在版權之限制下，目前尚難實現本目標。</p>

參考書目

- [1] 江哲銘(1997),「建築物理」,三民書局。
- [2] 周伯丞(2000),「建築軀殼開口部自然通風效果之研究」,國立成功大學建築研究所博士論文。
- [3] 陳念祖(2000),「高架地板置換式自然通風對室內通風效率之影響」,國立成功大學建築研究所碩士論文。
- [4] 邱瓊萱(2004),「通風管管頂型式對室內通風效益影響之研究」,國立成功大學建築研究所碩士論文。
- [5] 蘇裕民(2006),「小型建築中庭空間浮力通風之解析」,國立台灣科技大學建築研究所碩士論文。
- [6] 陳念祖(2007),「建築開口部裝設導風板對自然通風之效果」,國立成功大學建築研究所博士論文。
- [7] 陳彥志(2008),「室外風場對風壓通風影響之研究」,國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
- [8] 朱佳仁、秋英浩、陳彥志、王宇文(2009),「建築開口對風壓通風影響之研究」,中華民國建築學會建築學報,第69期,第17-33頁。
- [9] Chen, Q. and Jiang, Z. (1992), "Significant questions in predicting room air motion," ASHRAE Transaction, 98(1), 929-939.
- [10] Chen, Q. (1996), "Prediction of room air motion by Reynolds-stress models," Buildings & Environment, 31, 233-244.
- [11] Dascalaki, E., Santamouris, M., Bruant, M., Balaras, C.A., Bossaer, A., Ducarme, D., and Wouters, P. (1999), "Modeling large openings with COMIS," Energy & Buildings, 30, 105-115.
- [12] Ohba, M., Irie, K. and Kurabuchi, T. (2001), "Study on airflow characteristics in side and outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments," Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 89, 1513-1524.
- [13] Haight, F., Li, Y. and Mergo A.C. (2001) "Development and validation of a zonal model-POMA," Building & Environment, 36, 1039-1047.

- [14]Heiselberg, P., Svild, K. Nielsen and P.V. (2001), "Characteristics of airflow from open windows," *Building & Environment*, 36, 859-869.
- [15]Chang, T.J., Huang, M.Y., Wu, Y.T. and Liao, C.M. (2003), "Quantitative prediction of traffic pollutant transmission into buildings," *Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substance & Environmental Engineering*, A38, 1025- 1040.
- [16]Allocca, C., Chen, Q. and Glicksman L.R. (2003), "Design analysis of single-side natural ventilation," *Energy & Building*, 35, 785-795.
- [17]Jiang, Y., Alexander, D., Jenkins, H., Arthur, R. and Chen, Q. (2003) "Natural ventilation in building : measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 91, 331-353.
- [18]Kurabuchi, T., Ohba, M., Endo, T., Akamine, Y. and Nakayama, F. (2004) "Local dynamic similarity of cross-ventilation, Part 1: Theoretical framework," *International Journal of Ventilation*, 2, 371-382.
- [19]Tan, G. and Glicksman, L.R. (2005), "Application of integrating multi-zone model with CFD," *Energy and Buildings*, 37, 1049-1057.
- [20]Mochida, A., Yoshino, H., Takeda, T., Kakegawa, T. and Miyauchi, S. (2005) "Method for controlling airflow in and around a building under cross- ventilation to improve indoor thermal comfort," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 93, 437-449.
- [21]Seifert, J., Li, Y., Axley, J. and Rosler, M. (2006), "Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 94, 925-947.
- [22]Evola, G. and Popov, V. (2006), "Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings," *Energy & Buildings*, 38, 491-501.
- [23]Karava, P.m Stathopoulos, T. and Athienitis, A.K. (2007) "Wind-induced natural ventilation analysis," *Solar Energy*, 81, 20-30.
- [24]Hu, C.H., Ohba, M. and Yoshie, R. (2008) "CFD modeling of unsteady cross ventilation flows using LES," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 96, 1692-1706.
- [25]Gao, N.P., Niu, J.L., Perino, M. and Heiselberg, P. (2008) "The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings :

- Tracer gas simulation,” *Building & Environment*, 43, 1805-1817.
- [26]Chu, C.R. Chiu, Y.H., Chen, Y.J., Wang, Y.W. and Chou, C.P. (2009), “Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation,” *Building & Environment*, 44, 2064-2072.
- [27]Tung, Y.C., Shih, Y.C., Hu, S.C. and Chang, Y.L. (2010), “Experimental performance investigation of ventilation schemes in a private bathroom,” *Building & Environment*, 45, 243-251.
- [28]Chu, C.R. Chiu, Y.H. and Wang, Y.W. (2010), “An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings,” *Energy & Buildings*, 42, 667-673.
- [29]Tominaga, Y. and T. Stathopoulos (2007), “Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield,” *Atmospheric Environment*. 41(37), 8091-8099.
- [30]Hewitt, G.F., Shires, G.L. and Bott, T.R. (1994), “Process Heat Transfer,” CRC Press, Boca Raton, FL.

大型建築物自然通風之分析研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：方富民、黎益肇、林庚楊、杜祥寧

出版年月：103年12月

版次：第1版

ISBN：ISBN 978-986-04-2945-9 (平裝)