

熱浮力效應對建築物室內通風 影響之研究

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 100 年 12 月

10062B001

熱浮力效應對建築物室內通風 影響之研究

研究主持人：陳瑞鈴

協同主持人：朱佳仁

研究員：劉文欽 黎益肇

研究助理：王伯威 吳逸民

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 100 年 12 月

目次

| | |
|------------------|------|
| 目次 | I |
| 表次 | II |
| 圖次 | III |
| 摘要 | VIII |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 第一節 研究緣起與背景 | 1 |
| 第二節 研究目的 | 2 |
| 第三節 研究方法與過程 | 5 |
| 第二章 文獻回顧 | 9 |
| 第一節 建築通風 | 9 |
| 第二節 通風模式 | 16 |
| 第三節 通風研究文獻 | 18 |
| 第三章 台灣氣象資料 | 27 |
| 第四章 風洞實驗 | 47 |
| 第一節 實驗配置與量測方法 | 47 |
| 第二節 風壓實驗結果 | 53 |
| 第三節 熱浮力通風實驗結果 | 64 |
| 第五章 TAIVENT 計算模式 | 71 |
| 第一節 浮力通風計算模式 | 71 |

| | |
|---------------------------|----|
| 第二節 多區塊模式 | 74 |
| 第三節 TAIVENT模式介紹 | 76 |
| 第六章 通風計算案例 | 81 |
| 第七章 結論與建議 | 93 |
| 第一節 結論 | 93 |
| 第二節 建議 | 94 |
| 附錄一 期中審查會議記錄與回應 | 95 |
| 附錄二 期末審查會議記錄與回應 | 97 |
| 參考書目 | 99 |

表 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 表 2-1 各類建築物單位樓地板面積最小的通風量 | 10 |
| 表 2-2 台灣的室內空氣品質建議值 | 12 |
| 表 3-1 中央氣象局所屬地面氣象站資料表 | 28 |
| 表 3-2 台灣地區人工觀測氣象站之 48 年平均氣象資料 | 30 |
| 表 3-3 台北市各月份平均氣象資料表 | 32 |
| 表 3-4 台灣都會區氣溫發生機率 | 40 |
| 表 3-5 台灣地區的通風利用資料表 | 46 |
| 表 4-1 實驗流況之重要參數 | 65 |
| 表 6-1 建築物之尺寸與室內外氣溫 | 82 |
| 表 6-2 室外風速對建築物換氣率之影響 | 83 |
| 表 6-3 室內外溫差對建築物換氣率之影響 | 84 |
| 表 6-4 建築物高度對建築物換氣率之影響 | 85 |
| 表 6-5 室外風速對建築物換氣率之影響 | 87 |
| 表 6-6 室內外溫差對建築物換氣率之影響 | 88 |
| 表 6-7 建築物高度對建築物換氣率之影響 | 90 |
| 表 6-8 魔法學校會議廳自然通風量與換氣率之比較 | 91 |

圖 次

| | |
|---------------------------------------|----|
| 圖 1-1 風壓通風之示意圖 | 3 |
| 圖 1-2 浮力通風之示意圖 | 3 |
| 圖 1-3 (a)浮力和風壓通風具加成效果；(b)浮力和風壓通風具抵銷效果 | 4 |
| 圖 1-4 研究流程圖 | 6 |
| 圖 2-1 通風路徑之示意圖(a)短路通風；(b)換置通風；(c)活塞通風 | 13 |
| 圖 2-2 混合式及置換式通風之示意圖 | 15 |
| 圖 2-3 全域模式的流程圖 | 16 |
| 圖 2-4 計算浮力通風之示意圖 | 25 |
| 圖 3-1 中央氣象局氣象站位置圖 | 29 |
| 圖 3-2 台北市春季平均溫度的逐時變化圖(3 ~ 5 月) | 31 |
| 圖 3-3 台北市春季平均相對濕度的逐時變化圖(3 ~ 5 月) | 31 |
| 圖 3-4 台北市夏季平均溫度的逐時變化圖(6 ~ 8 月) | 34 |
| 圖 3-5 台北市夏季平均相對濕度的逐時變化圖(6 ~ 8 月) | 34 |
| 圖 3-6 台北市秋季平均溫度的逐時變化圖(9 ~ 11 月) | 35 |
| 圖 3-7 台北市秋季相對濕度的逐時變化圖(9 ~ 11 月) | 35 |
| 圖 3-8 台北市冬季平均溫度的逐時變化圖(12 ~ 次年 2 月) | 36 |
| 圖 3-9 台北市冬季平均相對濕度的逐時變化圖(12 ~ 次年 2 月) | 36 |
| 圖 3-10 台北、台中、台南、高雄月平均溫度的比較圖 | 37 |
| 圖 3-11 台北、台中、台南、高雄月平均相對濕度的比較圖 | 37 |
| 圖 3-12 台北全年平均之風花圖 | 38 |

| | | |
|-----------|----------------------|----|
| 圖 3-13 | 台中全年平均之風花圖 | 38 |
| 圖 3-14 | 台南全年平均之風花圖 | 39 |
| 圖 3-15 | 高雄全年平均之風花圖 | 39 |
| 圖 3-16 | 台北市氣溫的機率發生圖 | 41 |
| 圖 3-17 | 台中市氣溫的機率發生圖 | 41 |
| 圖 3-18 | 台南市氣溫的機率發生圖 | 42 |
| 圖 3-19 | 高雄市氣溫的機率發生圖 | 42 |
| 圖 3-20 | 台北市相對濕度的機率發生圖 | 43 |
| 圖 3-21 | 台中市相對濕度的機率發生圖 | 43 |
| 圖 3-22 | 台南市相對濕度的機率發生圖 | 44 |
| 圖 3-23 | 高雄市相對濕度的機率發生圖 | 44 |
| 圖 3-24 | 台北、台中、台南、高雄的通風利用率比較圖 | 45 |
| 圖 4-1 | 建築研究所風洞實驗室配置圖 | 48 |
| 圖 4-2 | 建築物模型置於第一轉盤之照片圖 | 49 |
| 圖 4-3 | 建築物模型置於第二轉盤之照片圖 | 49 |
| 圖 4-4 | 風壓實驗配置之示意圖 | 50 |
| 圖 4-5 | 熱浮力通風實驗之示意圖 | 50 |
| 圖 4-6 | 壓力掃瞄器 | 51 |
| 圖 4-7 | 壓力訊號處理系統 | 51 |
| 圖 4-8 | 皮托管 | 51 |
| 圖 4-9 | 氣相層析儀 | 51 |
| 圖 4-10(a) | 紊流邊界層平均風速剖面圖 | 54 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------|----|
| 圖 4-10(b) | 紊流邊界層紊流強度剖面圖 | 54 |
| 圖 4-11(a) | 平滑流中建築物迎風面中心線上平均風壓剖面圖 | 56 |
| 圖 4-11(b) | 平滑流中建築物側面中心線上平均風壓剖面圖 | 56 |
| 圖 4-11(c) | 平滑流中建築物背風面中心線上平均風壓剖面圖 | 57 |
| 圖 4-12(a) | 邊界層流中建築物迎風面中心線平均風壓剖面圖 | 57 |
| 圖 4-12(b) | 邊界層流建築物側面中心線平均風壓剖面圖 | 58 |
| 圖 4-12(c) | 邊界層流建築物背風面中心線平均風壓剖面圖 | 58 |
| 圖 4-13(a) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.3$ m 建築物迎風面之風壓分佈 | 59 |
| 圖 4-13(b) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.3$ m 建築物側面之風壓分佈 | 59 |
| 圖 4-13(c) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.3$ m 建築物背風面之風壓分佈 | 60 |
| 圖 4-14(a) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.6$ m 建築物迎風面之風壓分佈 | 60 |
| 圖 4-14(b) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.6$ m 建築物側面之風壓分佈 | 61 |
| 圖 4-14(c) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.6$ m 建築物背風面之風壓分佈 | 61 |
| 圖 4-15(a) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=1.2$ m 建築物迎風面之風壓分佈 | 62 |
| 圖 4-15(b) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=1.2$ m 建築物側面之風壓分佈 | 62 |
| 圖 4-15(c) | 比較平滑流與邊界層流中 $L=1.2$ m 建築物背風面之風壓分佈 | 63 |
| 圖 4-16 | 實驗流況之示意圖 | 64 |
| 圖 4-17(a) | Case 1 模型內外溫度隨時間變化圖 | 66 |
| 圖 4-17(b) | Case 2 模型內外溫度隨時間變化圖 | 67 |
| 圖 4-17(c) | Case 3 模型內外溫度隨時間變化圖 | 67 |
| 圖 4-18(a) | Case 1 模型內外溫度隨時間變化圖 | 68 |
| 圖 4-18(b) | Case 2 模型內外溫度隨時間變化圖 | 68 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 圖 4-18 (c) Case 3 模型內外溫度隨時間變化圖 | 69 |
| 圖 4-19 模型內示蹤劑氣體隨時間衰減的濃度圖 | 69 |
| 圖 5-1 熱浮力通風之示意圖 | 71 |
| 圖 5-2 建築物有室內隔間通風之示意圖 | 75 |
| 圖 5-3 通風模式 TAIVENT2.0 版的首頁 | 77 |
| 圖 5-4 建築物座落位置與環境參數的輸入介面 | 78 |
| 圖 5-5 建築物尺寸參數的輸入介面 | 78 |
| 圖 5-6 建築物開口參數的輸入介面 | 79 |
| 圖 5-7 建築物溫度參數的輸入介面 | 79 |
| 圖 5-8 TAIVENT 輸入檔與計算結果儲存介面 | 80 |
| 圖 6-1 具加成效果之熱浮力與風壓通風 | 81 |
| 圖 6-2 室外風速對換氣率之影響 | 82 |
| 圖 6-3 室內外溫差對換氣率之影響 | 83 |
| 圖 6-4 建築物高度對換氣率之影響 | 85 |
| 圖 6-5 具抵銷效果之熱浮力與風壓通風 | 86 |
| 圖 6-6 室外風速對具抵銷效果之浮力與風壓通風的影響 | 87 |
| 圖 6-7 室內外溫差對風速對具抵銷效果之浮力與風壓通風的影 | 88 |
| 圖 6-8 建築物高度風速對具抵銷效果之浮力與風壓通風的影響 | 89 |

摘要

關鍵詞：自然通風、熱浮力通風、風洞實驗、多區間通風模式、TAIVENT 模式

一、研究緣起

台灣介於亞熱帶及熱帶之間，夏天不僅氣溫高、濕度亦高。台灣的建築物大多使用冷氣空調來改善室內環境，但是空調設備會耗損大量的能源。若能有效地利用自然通風來維持室內居住環境，減少機械通風的使用，將可達到節能減碳之目的。自然通風主要依賴自然界的風力及室內外的氣溫差異驅使室內外空氣流動、交換。但室外風速和氣溫與時俱變，自然通風不易控制。因此若想充分利用自然通風維持舒適的室內環境，必須有一個通風模式可以針對建築物基地的氣象條件，計算各種建築設計之自然通風的通風量與換氣率。

二、研究方法及過程

本計畫將內政部建築研究所於去年(99 年度)發展的風壓通風計算模式TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)加上熱浮力通風的計算模組，成為TAIVENT 2.0 版。模式將可計算各種建築物座向、室內隔間、開口位置、大小等狀況之熱浮力與風壓通風同時作用下，建築物的自然通風量與換氣率。通風模式所需之建築物表面風壓則利用內政部建築研究所的風洞實驗室及多頻道壓力掃瞄計量測得之。並將建築模型放置於一塊加熱板之上，以示蹤劑濃度衰減法量測熱浮力驅動之通風量。最後以幾個國內常見建築物案例說明自然通風的特性。

三、重要發現

1. 本計畫分析整理台北、台中、台南及高雄四個都會區 1961~2008 年的氣象資料(風速、風向、氣溫、濕度)，評估台灣各地區的自然通風利用率，結果顯示風壓通風的利用率皆高於熱浮力通風利用率，兩者合計皆在 40% 以上。

2. 研究結果發現：視風向與開口高低位置而定，風壓與熱浮力有時具有加成效果，有時則會互相抵銷。但不論風壓通風或熱浮力通風，建築物開口面積為最主要影響通風量之參數，也是最容易控制之參數。建築師應多設置可開關的門窗，讓建築物使用者依其喜好可自行改變通風量。

此外，風洞實驗僅量測矩形建築物的表面風壓分佈，其他型式建築物的表面風壓可藉由風洞模型實驗或計算流體動力學模式求得，再輸入到 TAIVENT 模式中，來計算建築物的通風量與換氣率。

四、主要建議事項

根據本計畫的研究成果，研究單位在此提出下列建議，以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議-研究集合式住宅對建築物自然通風的影響

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

台灣都會區的住宅大多屬於公寓、高層住宅大樓等集合式住宅(Multi-family dwelling unit)。這類的集合式建築物往往因為過於密集，會影響建築物的自然通風，前人的通風研究皆未針對此問題進行深入的研究。因此未來可利用風洞實驗或計算流體力學模式探討集合式住宅的自然通風特性，研究各種排列方式、建築物間距、座向等建築設計對風壓通風的影響，以找出最能利用當地的氣象條件之通風設計。

長期型建議-研究室內障礙物對建築物通風的影響

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

本研究所發展的 TAIVENT 模式目前可以計算建築物各種室內隔間的通風量與換氣率，但無法計算室內有大型障礙物，如屏風、書架、傢俱、樑柱或辦公室隔間

(Partition)等的通風量。不僅 TAIVENT 模式無法考慮室內障礙物，國外所發展的多區塊模式亦無法計算室內障礙物對於通風量的影響。因此未來可採用阻抗模式 (Resistance model)，研究各種常見傢俱對氣流所造成的阻抗，再計算對建築物通風量影響的程度，讓設計者可以清楚的知道室內阻抗如何影響建築物通風量與換氣率。

ABSTRACT

Keywords: Natural ventilation, Buoyancy-driven ventilation, Wind tunnel experiment

This project investigated the applicability of buoyancy-driven ventilation for the typical residential buildings in Taiwan. A module for computing the buoyancy ventilation was developed and integrated into the multizone model TAIVENT. The TAIVENT ventilation model is based on the mass conservation and uses the orifice equation to calculate the ventilation through the building openings. Besides, the 1961-2008 weather data (wind speed, wind direction, air temperature and humidity) of four major cities in Taiwan from the Central Weather Bureau were analyzed. The results revealed that the applicability of wind-driven ventilation is higher than that of buoyancy-driven ventilation in Taiwan. Furthermore, through a series of wind tunnel experiments, the ventilation rates of a model building under various flow conditions were measured by the tracer gas technique. The experimental results can be used to validate the TAIVENT model. The architects could employ the TAIVENT model to determine the best building design for natural ventilation, and effectively preclude the utilization of mechanical ventilation.

第一章 緒論

第一節 計畫緣起

台灣為位於北回歸線上的海島，介於亞熱帶及熱帶之間，夏天不僅氣溫高、濕度亦高。台灣的建築物為了維持室內環境的舒適性，大多使用冷氣空調來維持建築物室內氣溫保持在一個熱舒適(Thermal comfort)的範圍之內，但是使用空調設備會耗費大量的電力，特別是在炎熱的夏季。若能減少使用冷氣空調，有效地利用自然通風(Natural ventilation)協助或維持室內居住環境達到以上的狀況，將可達到節能減碳之目的。黃國倉(2006)的研究指出：國內一般辦公大樓空調耗電比率佔建築能耗約 45%，長期累積的耗費的能源十分可觀。英國建築研究機構(British Research Establishment, BRE)的研究結果顯示：採用自然通風和採用空調的辦公大樓相比，每年節省的冷卻耗能為 14 ~ 41 kWh/m²，減少的費用為 1.3 ~ 3.6 美元/m²。

除此之外，自然通風可去除室內有害的污染物，改善室內空氣品質(Indoor Air Quality, IAQ)。室內空氣品質和室內的溫度、濕度、通風、噪音、光線合稱為室內環境。室內環境的良窳對於建築物使用者有明顯的影響，室內環境不佳的建築物，輕者造成建築物使用者不舒服的感覺，影響到使用者的居住品質或工作效率；嚴重者可能發生「病態大樓症候群(Sick Building Syndrome)」，譬如 2003 年 SARS 病毒在台北市和平醫院的院內感染，造成許多人感染 SARS。

但建築物使用自然通風亦有其限制，自然通風主要依賴室外自然的風場(風力)及室內外的溫差(浮力)驅使室內外空氣交換、流動。當室外無風，或室外氣溫太高及太低，或室外空氣污染太嚴重時，自然通風便不適用。且室外風速和氣溫與時俱變，自然通風不易控制。因此若要定量評估自然通風的適用性，必須對建築物基地的風場及氣候條件的變化有深入的瞭解。

除此之外，建築物的設計與自然通風有著密不可分的關係，譬如建築物的外型、座向、開口位置、大小及室內隔間皆會影響自然通風的適用性。若想充分利用自然通風創造舒適的室內環境，必須針對建築物基地的風場及氣候條件，找出有利於自然通風之建築設計。換言之，必須有一個自然通風模式可以計算不同風速、風向、溫濕度狀況下，各種建築設計(外型、座向、開口位置、大小及室內隔間)自然通風的換氣率。

通風計算模式可定量評估各種建築物自然通風的適用時段，甚至可利用智慧型控制系統，依據室外風場、氣溫的狀況，自動控制建築物開口的大小及開闔，在自然通風與機械通風系統之間切換，達到充分利用自然通風，減少建築耗能的目的。國外已有許多個計算建築物通風的計算模式，譬如計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模式和多區塊模式(Multizone model)。多區塊模式皆是依據質量守恆原理計算各個房間之間的通風量，譬如 COMIS、CONTAM、MMPN、POMA 模式。但這些模式有些是適用於機械通風，有些模式未考量室內隔間、開口是否有紗網、百葉窗對室內氣流的影響。且這些模式皆未考量台灣的建築特性及氣候狀況，使得國內建築師大多無法有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出自然通風的節能建築。

內政部建築研究所 99 年度的研究計畫「台灣地區建築物室內自然通風模式之建立研究」所發展的 TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model) 模式僅考慮風壓通風的狀況，未考量熱浮力效應對自然通風之影響。因此本研究計畫針對室內外溫度差異驅動的通風狀況進行研究，並在 TAIVENT 模式中加入熱浮力效應，計算有室內溫差時的通風量與換氣率。使得 TAIVENT 模式更加的完善，成為國內業界設計建築通風的工具之一。讓台灣建築師可以有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出自然通風的綠建築，有效地利用自然通風協助或維持室內空氣品質和居住環境，讓自然通風真正地在台灣落實，創造舒適的室內環境，並減少建築物所消耗的能源。

第二節 研究目的

自然通風(Natural ventilation)主要是依靠建築物內外的氣壓差異或溫度差異所造成的空氣流動。依其通風的驅動力又可分為風壓通風和浮力通風(朱佳仁, 2006)。

- (1)風壓通風(Wind-driven ventilation)：利用自然風力作用在建築開口(門窗)處的風壓差異，造成空氣流動與建築物室內外的空氣交換。因為建築物迎風面為正壓區，背風面為負壓區。若迎風面和背風面皆有開口，則會造成貫流通風(Cross ventilation)，氣流由迎風面的開口進入，由背風面的開口為流出，其通風效果最佳。若僅迎風面有開口或僅背風面有開口的單側通風(Single-sided ventilation)，亦可造成自然通風，但通風效率不及貫流通風。

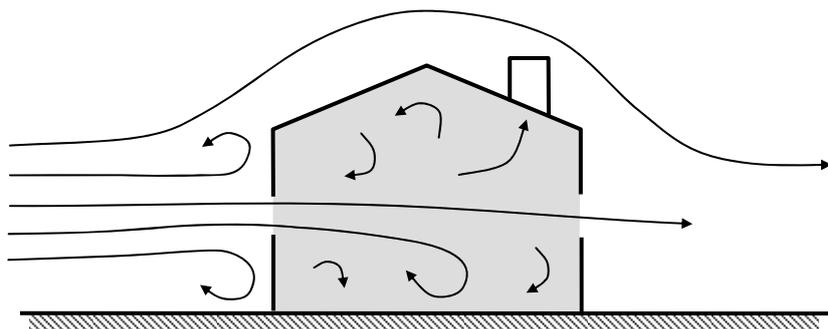


圖1-1 風壓通風之示意圖

資料來源：本研究整理

- (2)浮力通風(Buoyancy-driven ventilation)：又稱為重力通風，因為室內外溫度差異所造成的浮力，促使室內外空氣交換、對流(Linden, 1999)。譬如大樓內有中庭(Atria)挑高或通風豎井的建築物，室內有垂向的溫度差異，且上下皆有開口，則熱空氣會由上方的開口流出，而室外的冷空氣會由下方開口流入補充，達到換氣的效果。

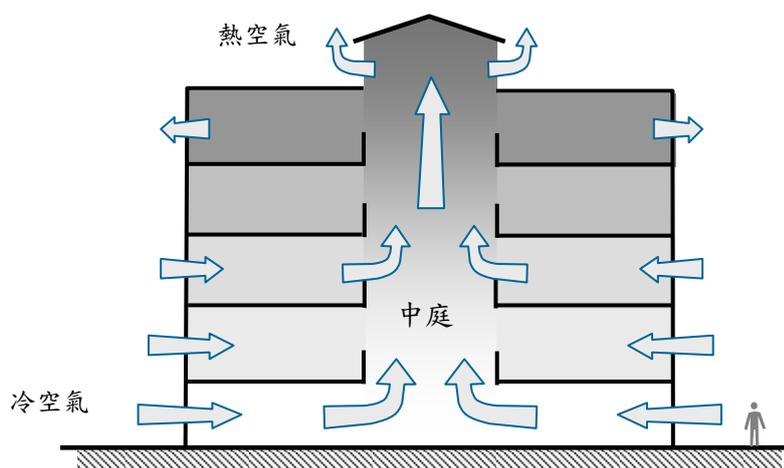


圖1-2 浮力通風之示意圖

資料來源：本研究整理

風壓通風與浮力通風同時存在時，視風向與建築物開口位置，有時可增加通風效果，有時又會抵銷兩者的通風效果。如圖 1-3(a)所示，當迎風面開口位於低處，背風面開口位於高處，冷空氣由建築物的迎風面開口灌入，推動熱空氣由背風面開口流出，風壓與浮力具有加成的效果。但當迎風面開口位於高處，背風面開口位於低處時，如圖 1-3(b)所示，則熱空氣不易由迎風面開口流出，冷空氣亦無法由建築物的背風面開口流入，風壓與浮力互相抵銷其通風效果(Hunt and Linden, 1999)。

風壓通風受許多因素的影響，譬如室外的風速、風向、建築物的外型、門窗開口的面積大小、位置、形式、室內隔間、傢俱擺設、周遭建物的配置等因素。因此針對一棟尚未興建的建築物，定量評估其室內自然通風量較為困難。自然通風的優點為節省能源，適用於住宅、小型的室內空間。但缺點為通風量受室外風場的影響，較難控制通風量，且不適用於大型的公共空間。

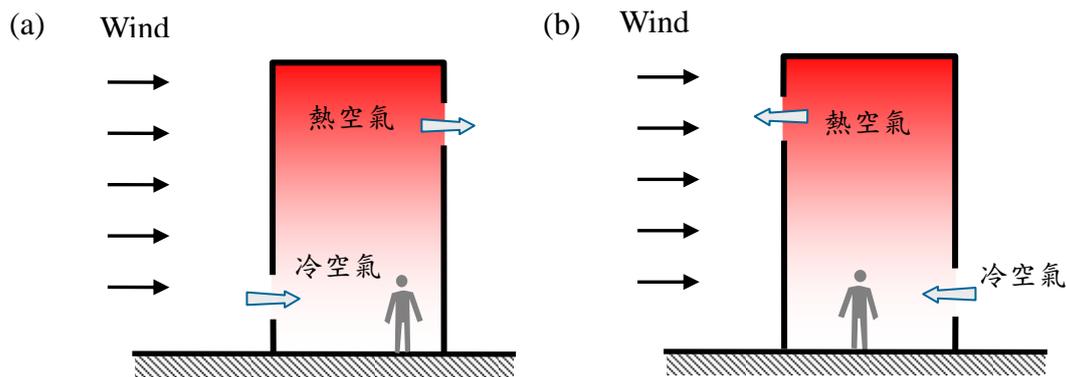


圖1-3 (a)浮力和風壓通風具加成效果；(b)浮力和風壓通風具抵銷效果

資料來源：本研究整理

因為台灣夏季室外氣溫高，單一樓層建築物不易藉由浮力通風達到散熱通風之效果。反之，通風良好的住宅、教室、辦公樓等建築，風壓通風可以有散熱的效果。本計畫針對浮力通風進行研究，將 TAIVENT 模式擴充至包括浮力通風的計算。

本研究將內政部建築研究所發展的風壓通風計算模式 TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model) 加上熱浮力通風的部分，模式將可計算熱浮力與風壓通風同時作用下，建築物通風量與換氣率。TAIVENT 模式可藉由中文的 Windows 介面輸入建築

物座向、開口位置、大小及室內隔間等參數、基地的風場、氣象資料(風速、風向、氣溫、濕度)，或利用中央氣象局各地的氣象資料，計算建築物風壓通風的通風量與換氣率，進而評估一般建築物可使用風壓通風的時段。對於尚未興建之建築物，亦可利用此模式找出有利風壓通風之建築設計。具體而言，本研究的目的包括下列四項：

- 一、TAIVENT模式可用於計算建築物在各種座向、開口位置、面積大小、室內隔間的狀況下，建築物的通風量與換氣率。國內的建築師可利用TAIVENT模式計算各種建築設計之通風量與換氣率，以設計出最能配合當地氣候條件的建築設計(座向、門窗開口之位置、面積大小、室內隔間)，提升國內建築節能的技術。
- 二、利用風洞實驗量測矩形建築物的表面風壓係數，建築物前方有一個不透風式防風設施，對建築物表面的風壓分佈及通風之影響。實驗所得之風壓值可以套入模式中計算建築物風壓通風量之用，並將量測值建立成一個資料庫以供計算建築物之表面風壓，以供計算建築物風壓通風之用。這部份的研究使用內政部建築研究所的風洞實驗室來進行，利用多頻道壓力掃描計量測壓克力縮尺模型的表面風壓分佈。
- 三、分析1961 ~ 2008年間中央氣象局全台25個地面氣象站的氣象資料(風速、風向、氣溫、濕度等)，進而計算各地各月份的溫濕度、平均風速與盛行風向。以統計各地最常發生的盛行風向、平均溫濕度與平均風速。並將分析的結果建立成一個資料庫，可查詢台灣各地風場資料之用。
- 四、TAIVENT模式結合台灣中央氣象局各地的風場、氣象資料庫，或輸入基地的風場(風速、風向)及氣象(氣溫、濕度)資料，並針對台灣常見住宅式建築物及室內隔間方式，定量評估風壓通風的適用性及特性，以期找出有利於風壓通風的建築設計。

對於已完工之建築物，亦可利用TAIVENT 2.0模式計算建築物在不同季節，適合使用自然通風的時段(白天、夜晚)或時數，以減少建築物對機械通風的依賴，有效達到建築物節能、減碳之目的，並創造舒適的室內環境。

第三節 研究方法與過程

本計畫依據通風理論與流體質量守恆原理，建構一個適用於台灣地區的自然通風模式 TAIVENT，可計算多區間建築物(Multi-zone)的通風量與換氣率。模式利用台灣中央氣象局各地氣象站的氣象資料，或自行輸入建築基地的盛行風向、平均風速、

溫濕度等氣象資料，配合風洞實驗量測得之建築物表面風壓，便可計算多區間建築的風壓通風之通風量或換氣率，計畫執行步驟如圖 1-2 所示。

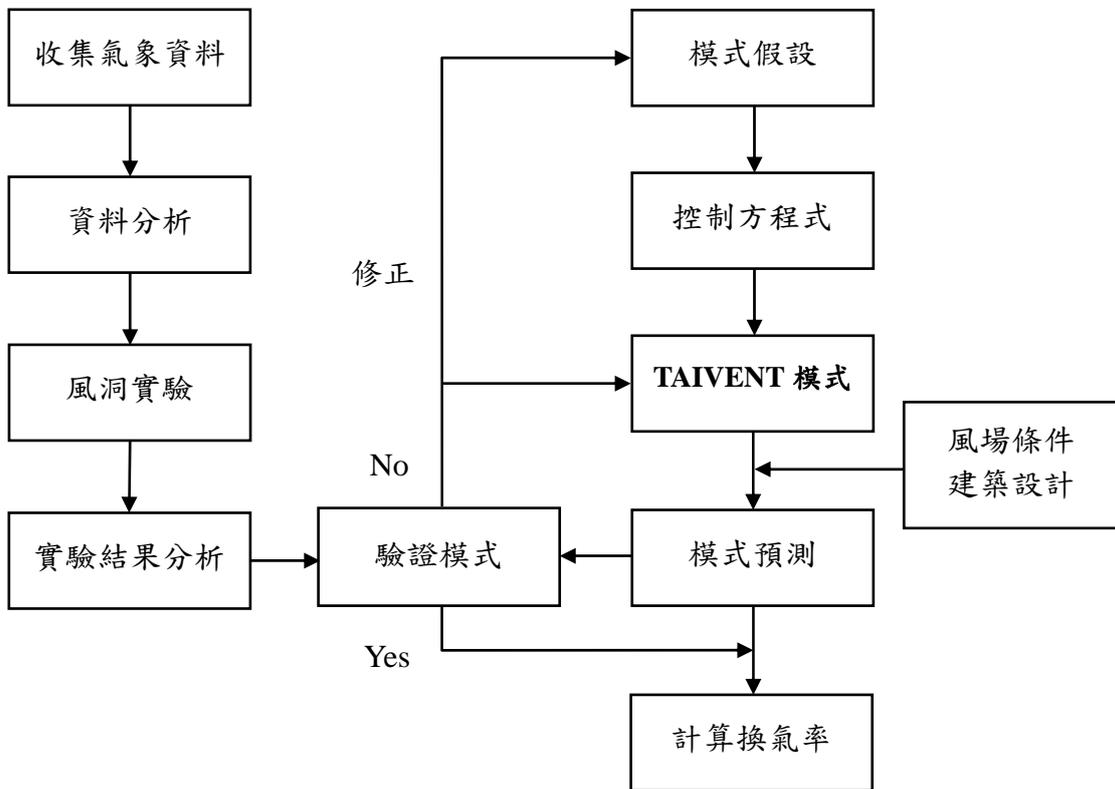


圖 1-4 研究流程圖

資料來源：本研究整理

本計畫已完成之氣象資料統計分析，建立台灣各地的盛行風向、平均風速、溫度與濕度等氣象資料之資料庫，可供建築業者及各界研究、查詢之用。第二部份的風洞實驗已在 2010 年 7 月到建築研究所的風洞實驗室量測矩形建築物的表面風壓分佈，並將表面風壓係數建立成一個資料庫。第三部份 TAIVENT 模式建構部分也已完成多區間建築物的通風量計算。第四部分則利用 TAIVENT 模式計算台灣常見之住宅式建築物及室內隔間方式的通風量與換氣率，評估自然通風對於台灣常見建築物的適用性及特性。

本研究報告共包括六章，主要章節內容為：第一章為緒論，說明研究的背景、

研究目的、研究方法與過程及各章的內容；第二章介紹建築通風的理論及相關的國內外通風研究文獻，包括室內換氣率與通風量的計算、各種通風計算模式的應用；第三章說明台灣地區氣象資料分析之結果；第四章描述 TAIVENT 通風模式、計算流程及使用介面；第五章列舉幾個通風計算案例，並利用計算結果說明風壓通風之特性；第六章為結論與建議事項。

第二章 文獻回顧

第一節 建築通風

建築物通風之目的在於提供室內新鮮的空氣，移除或稀釋室內污染物，使得室內具有建築物使用者可接受的空氣品質。建築物可藉由機械通風(Mechanical ventilation)或自然通風(Natural ventilation)的方式來達到建築物換氣的需求，但機械通風耗費能源，自然通風不穩定，各有其利弊。必須經由相關的研究瞭解這兩種通風方式的適用條件與狀況，方能找出最佳的建築通風設計。

建築物換氣的頻率可由換氣率(Air exchange rate)來定義：

$$I = \frac{Q}{V} \quad (2-1)$$

式中 V 為室內空間的體積， Q 為流入室內的空氣流量，因次為 $[L^3/T]$ 。換氣率的因次為 $[1/T]$ ，若換氣率的單位採用 $[1/\text{hour}]$ ，換氣率可稱為小時換氣率(Air change per hour, ACH)。換氣率代表單位時間內換置相當室內體積空氣量之次數。換氣率愈大，表示室內空氣更新的頻率愈高，空氣愈容易流通。

換氣率的倒數則可視為室內空氣更新所需的時間尺度(Time scale)：

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (2-2)$$

此時間尺度可作為評估室內空氣更新快慢的指標(Roulet, 2008)，時間尺度愈大，空氣滯留於室內的時間愈長，室內通風愈差，污染物愈容易累積於室內而使得空氣品質惡化。

許多國家皆針對建築物換氣率訂定標準，美國環保署室內空氣品質規範(US EPA, Building Air Quality, 1998)建議在不裝設機械通風設備的狀況下，住宅之最低換氣率須維持在 0.35 ACH。加拿大建築規範(Canadian Standards Association, CAN/CSA-F326, 1995)關於住宅通風系統的部分建議住宅的客廳、餐廳通風量必須達到 5 liter/sec，主臥室的通風量 10 liter/sec，平均換氣率必須維持 0.3 ACH 以上。日本工業標準(JIS, 2003)建議：住宅換氣率必須達到 0.5 ACH，非住宅換氣率必須達到 0.3 ACH。

表 2-1 為台灣建築技術規則建築設備編(2009)第 102 條訂定各類建築物單位樓地板面積最小的通風量。

表2-1 各類建築物單位樓地板面積最小的通風量

| 建築物 | | 通風量 (m ³ /hr/m ²) |
|--|------|---|
| 臥室、起居室、私人辦公室等容納人數不多者 | | 8 |
| 辦公室、會客室 | | 10 |
| 工友室、警衛室、收發室、詢問室 | | 12 |
| 會議室、候車室、候診室等容納人數較多者 | | 15 |
| 展覽陳列室、理髮美容院 | | 12 |
| 百貨商場、舞蹈、棋室、球戲等康樂活動室、 灰塵較少之工作室、印刷工場、打包工場 | | 15 |
| 吸煙室、學校及其他指定人數使用之餐廳 | | 20 |
| 營業用餐廳、酒吧、咖啡館 | | 25 |
| 戲院、電影院、演藝場、集會堂之觀眾席 | | 75 |
| 廚房 | 營業用 | 60 |
| | 非營業用 | 35 |
| 住宅內浴室或廁所 | | 20 |
| 公共浴室或廁所，可能散發有害氣體之工廠 | | 30 |
| 汽車庫 | | 25 |

資料來源：台灣建築技術規則建築設備編

Etheridge and Sandberg (1996)定義換氣效率(Air exchange efficiency)為空氣更新的時間尺度 與兩倍室內平均空氣齡 $\langle \tau \rangle$ 之比值：

$$\eta = \frac{\tau}{2 \cdot \langle \tau \rangle} \quad (2-3)$$

式中 $\langle \tau \rangle$ 為室內平均空氣齡(Mean age-of-air)，定義為室內所有點的局部空氣齡

(Local age-of-air)之平均值。局部空氣齡的定義為新鮮空氣由入口處流動至空間中任一點所需之平均時間。空氣齡之長短會隨所處之位置不同而有所變化，可在建築物內灌入示蹤劑(Tracer gas)，再量測其濃度變化計算該建築物的空氣齡。

換氣效率與室內氣流型態有關，若 $\eta < 50\%$ ，則為短路通風(Short-circuiting ventilation)，此種流況進入室內的空氣，未完全混合室內空氣，就直接由最近之開口流出，如圖 2-1(a)所示。此種流況未能完全換置原本滯留在室內的空氣，部分空氣停留在室內的時間短於平均空氣齡，但其他空氣滯留在於室內的時間長於平均空氣齡。換言之，換氣效率不佳；若 $\eta = 50\%$ ，室內氣流為完全混合狀態(well-mixed)，排氣口濃度等於室內濃度；若 $50\% < \eta < 100\%$ ，室內氣流為置換式(Displacement ventilation)氣流型態，如圖 2-1(b)所示；若 $\eta = 100\%$ ，室內氣流稱為活塞通風(Piston ventilation)，如圖 2-1(c)所示，進入室內的空氣完全換置原本在室內的空氣，通風效率最佳。

台灣環保署(2005)建議室內氣溫應介於 $15\sim 28^{\circ}\text{C}$ 之間(不分季節)。歐盟 2007 年訂定之室內環境標準(EN 15251)建議：夏季室內氣溫應介於 $23\sim 26^{\circ}\text{C}$ ，冬季室內氣溫介於 $20\sim 24^{\circ}\text{C}$ 。除了氣溫之外，濕度亦會對建築物使用者的感受亦有極大的影響。MacFarlane (1958)觀察到緯度 30 度以內的地區，當相對濕度高時，人體所能忍受的高溫就較低，他建議相對濕度低於 60 %時，人體可接受氣溫(乾球溫度計)介於 $24\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之間。當相對濕度超過 60 %時，相對濕度每增加 10 %，人體可接受氣溫就要降低 0.8°C 。換言之，相對濕度 90 %時，人體可接受氣溫介於 $21.6\sim 27.6^{\circ}\text{C}$ 之間。MacFarlane (1958)也發現室內的微風可加速體溫及濕氣的散失，可增加人體所能忍受的溫度範圍，他建議風速低於 1.0 m/s時，風速每增加 0.15 m/s，人體可接受氣溫可增加 0.55°C 。換言之，室內的風速 0.9 m/s時，人體可接受氣溫介於 $27.3\sim 33.3^{\circ}\text{C}$ 之間。Evans (1979)建議當相對濕度介於 50~70 %時，白天的熱舒適氣溫範圍介於 $23\sim 29^{\circ}\text{C}$ 之間，晚上的熱舒適氣溫範圍介於 $17\sim 23^{\circ}\text{C}$ 。

除此之外，人體對於風速的感受因人而異，一般人在風速大於 0.5 m/s 時可受到氣流的運動；風速在 1.0 m/s 以下時，可將人體的熱量帶走，讓人在濕熱的環境中，感受到涼爽、愉快的感覺。但在寒冷的冬季，風速因為會帶走體溫，可能會讓人有冷颼颼的感覺；當室內風速超過 2.0 m/s，桌面上紙張會被吹散、亂飛，會影響辦公室類型的工作，因此必須限制室內風速在一個合理範圍。

表 2-2 台灣的室內空氣品質建議值 (環保署, 2005)

| 污染物濃度 | 第一類場所 | 第二類場所 | 平均時間 |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| 二氧化碳(CO ₂) | 600 ppm | 1000 ppm | 8 hr |
| 一氧化碳(CO) | 2.0 ppm | 9.0 ppm | 8 hr |
| 臭氧(O ₃) | 0.03 ppm | 0.05 ppm | 8 hr |
| 甲醛(HCHO) | 0.1 ppm | 0.1 ppm | 1 hr |
| 揮發性有機物(VOC) | 3.0 ppm | 3.0 ppm | 1 hr |
| 懸浮微粒(PM ₁₀) | 60 g/m ³ | 150 g/m ³ | 24 hr |
| 懸浮微粒(PM _{2.5}) | 100 g/m ³ | 100 g/m ³ | 24 hr |
| 細菌 | 500 菌落數/m ³ | 1000 菌落數/m ³ | 最高值 |
| 真菌 | 1000 菌落數/m ³ | 1000 菌落數/m ³ | 最高值 |
| 溫度 | 15 ~ 28 °C | 15 ~ 28 °C | 1 hr |

第一類場所：對室內空氣品質有特殊要求的場所，包括學校、兒童遊樂場所、醫療院所等。

第二類場所：一般公共場所，包括辦公大樓、營業、展覽場所、地下街、車站及大眾運輸工具等。

資料來源：環保署

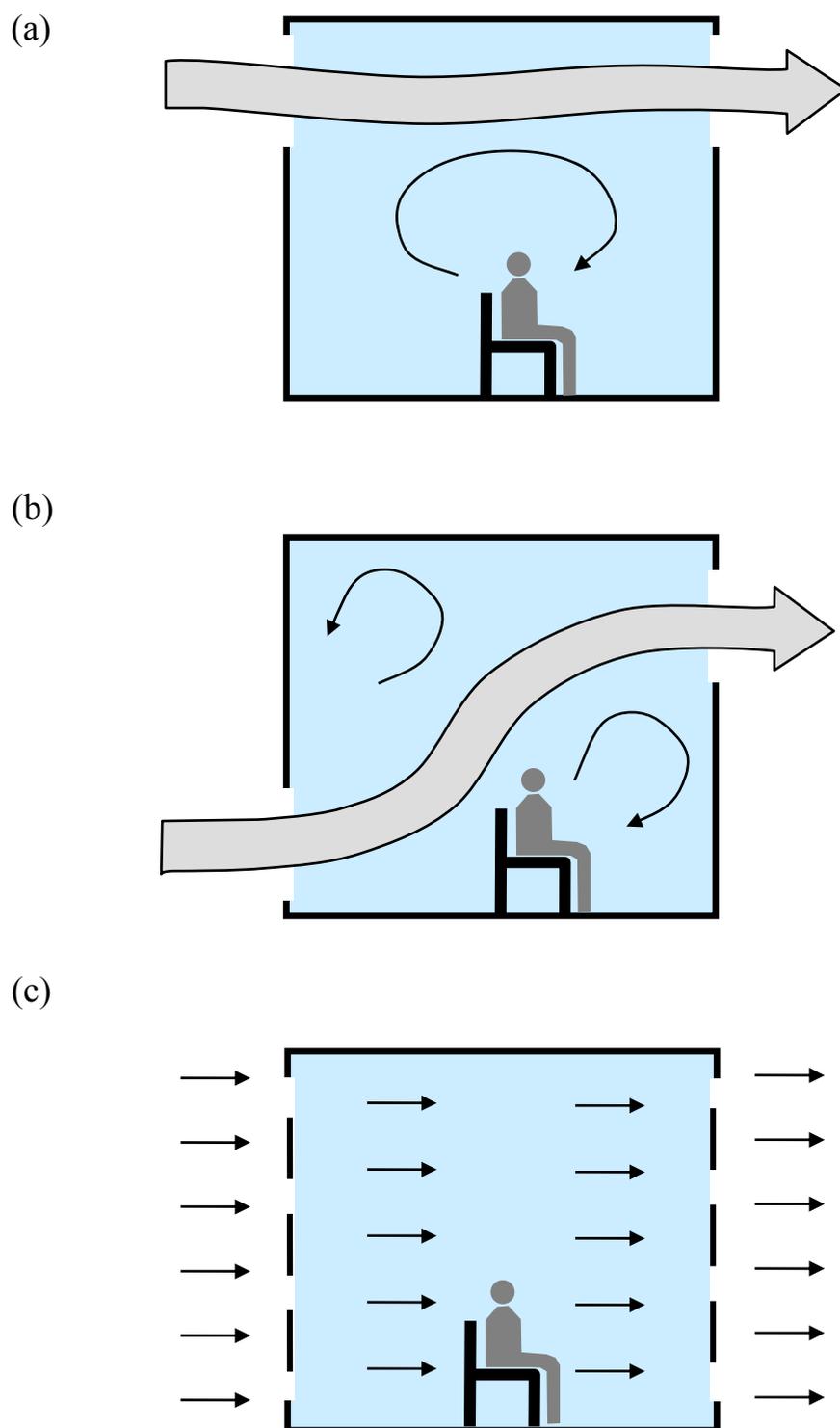


圖 2-1 通風路徑之平面示意圖(a)短路通風；(b)換置通風；(c)活塞通風
資料來源：本研究整理

自然通風又可分為風壓通風及浮力通風。風壓通風(Wind-driven ventilation)乃是利用自然風力作用在建築開口(門窗)處的風壓差異,造成空氣流動與建築物室內外的空氣交換。浮力通風(Buoyancy-driven ventilation)係由室內外溫度差異所造成的熱浮力,促使室內外空氣交換、對流。譬如大樓內有挑高的中庭或通風豎井的建築物,室內有垂向的溫度差異,且上下皆有開口,則熱空氣會由上方的開口流出,而室外的冷空氣會由下方開口流入補充,達到換氣的效果。

風壓通風的優點為:

1. 通風量大且效率高。
2. 使用容易,打開門窗讓自然風吹入。
3. 建置成本(設置門窗)低,無操作成本,可減少建築物耗能。
4. 用戶可自行控制門窗開口來改變通風量。

其缺點:

1. 室外風速和風向的不確定性使得風壓通風的不穩定。
2. 不適用於室外氣溫過低的氣候(如寒冷的冬季)。
3. 如果室外空氣品質差,會影響室內空氣品質,但浮力通風亦有此問題。
4. 風速大時會引起不舒適,但可改變開口面積改善此問題。

浮力通風的優點包括:

1. 利用室內人員、電器設備產生的熱浮力,氣流相對穩定。
2. 不依賴室外的自然風,在無風的狀態仍然可以產生通風效果。
3. 可藉由建築物的設計引導空氣的流動。

其缺點為:

1. 通風量較風壓通風小。
2. 依賴室內外溫度差異,不適用於炎熱的夏季。
3. 建築物設計上受到局限,譬如高低處皆要有開口,或要有通風豎井或天窗。

浮力與風壓通風的強度可以藉由阿基米德數(Archimedes number)來界定:

$$Ar = \frac{g\Delta\rho\sqrt{A}}{\rho U^2} \quad (2-4)$$

式中 A 為開口面積， U 為室外風速， $\Delta\rho = |\rho - \rho_e|$ 為室內上層空氣的密度 ρ 與室外空氣的密度 ρ_e 的差異， g 為重力加速度， $g\Delta\rho/\rho$ 可稱為浮力加速度。阿基米德數可視為浮力通風與風壓通風強度之比，當室內外無溫度差異 $\Delta\rho = 0$ 時，阿基米德數 $Ar = 0$ ，計算通風量時僅需考慮風壓通風；當室外無風的狀況 $U = 0$ ，阿基米德數 $Ar \rightarrow \infty$ ，通風由熱浮力所主導。

浮力通風可分為混合式通風和置換式通風。混合式通風(Mixing ventilation)是指由室外流入的冷空氣與室內的熱空氣完全混合，使得室內的溫度與密度均勻分佈，通風是由混合之後的室內氣溫與室外氣溫之間的差異來驅動。置換式通風(Displacement ventilation)則利用建築物低處的開口引入室外的冷空氣，推擠室內的熱空氣由高處的開口流出，室內因上下溫度的差異呈現冷空氣在下，熱空氣在上的密度分層現象，室內的冷、熱空氣只有在中間的交界面混合，如圖 2-2 所示。置換式通風因為室內、外氣溫差異較高，換氣效率高於混合式通風。

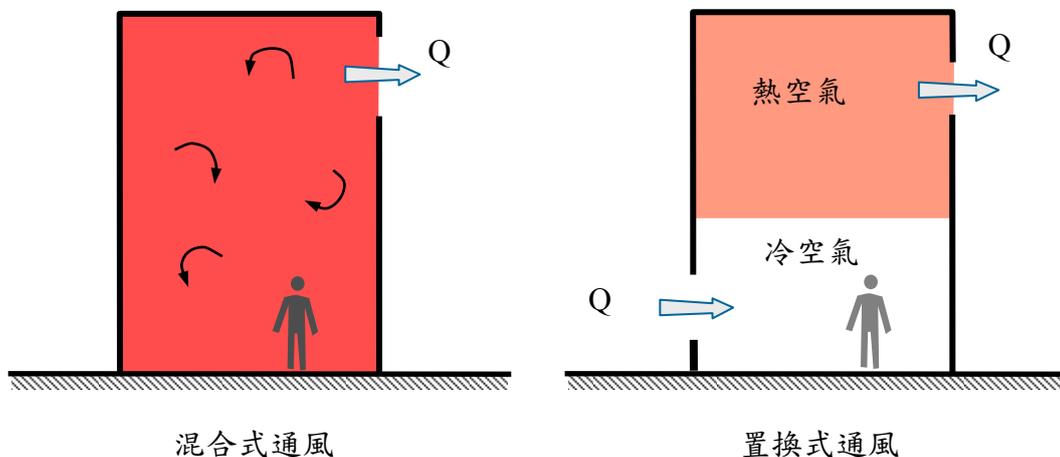


圖2-2 混合式及置換式通風之示意圖

資料來源：本研究整理

自然通風受許多因素的影響，譬如建築物外的風速、風向、室內外溫度的差異，建築物的幾何外型、門窗開口的面積大小、位置和室內隔間等因素。因此針對

一棟尚未興建的建築物，定量評估其室內自然通風量較為困難。

第二節 通風模式

建築物的換氣率及通風效果可藉由數值模式來計算，而計算室內風場及其傳輸現象的通風模式可分為：全域模式及多區塊模式，以下分述之：

1. 全域模式(Field model)：

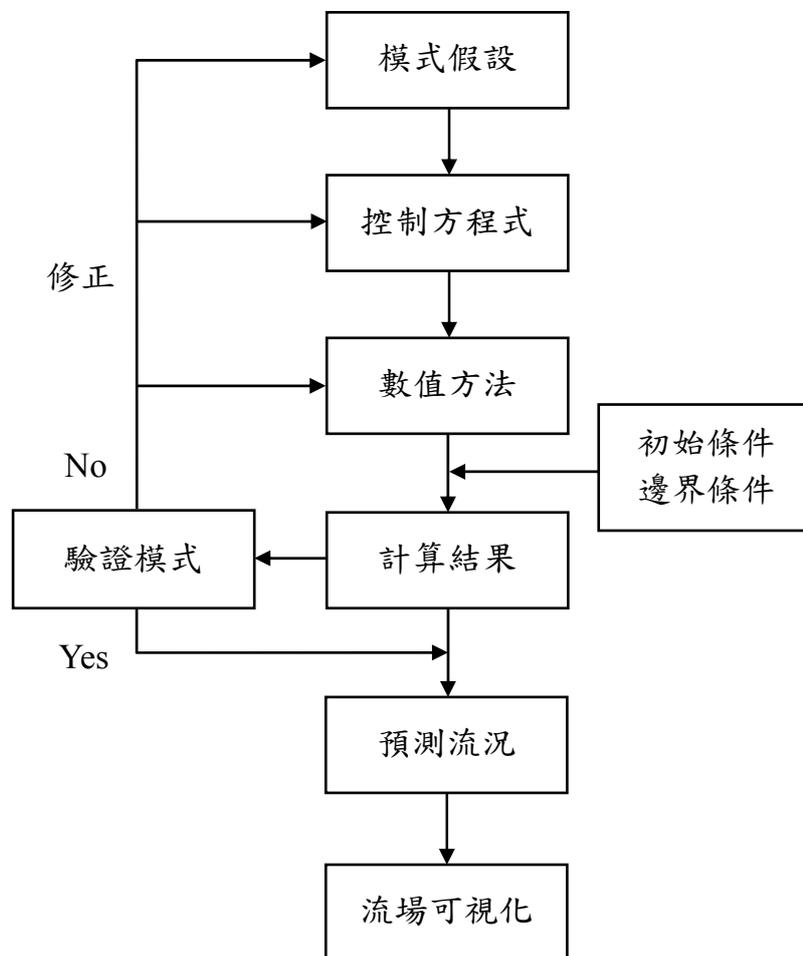


圖 2-3 全域模式的流程圖

資料來源：本研究整理

此法又稱為計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)，將室內空間格網化，依據連續方程式(Continuity eqn.)、那維爾 - 史托克(Navier-Stokes eqns.)方程式和擴散方程式，配合上適當的邊界和初始條件，採用數值方法計算各個格網點上的風速和濃度。其優點為可以計算出流場的細部變化，但缺點為模式複雜，且計算量大(Awbi, 2003)。全域模式的計算結果會受到模式的設定(譬如模式參數、格網大小、邊界和初始條件等因素)的影響，因此計算結果必須與相同流況之實驗數據比對以驗證其正確性(Chen, 2009)，如圖 2-3 所示。

室內通風最常使用的數值模式為 $k - \varepsilon$ 紊流模式，此模式乃 Launder & Spalding (1974) 首先提出，他們建議紊流流場中，紊流黏滯係數為紊流動能 k 及動能消散率 ε 的函數：

$$v_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-5)$$

其中 c_μ 為模式常數，亦即紊流動能愈大或動能消散率愈小，則紊流黏滯係數愈大。除了時間平均之連續方程式和那維爾 - 史托克方程式， $k - \varepsilon$ 模式還包含紊流動能及動能消散率的控制方程式：

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-6)$$

$$\frac{D\overline{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + v_T \nabla^2 \overline{U}_i \quad (2-7)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{c_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_T \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (2-8)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{c_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} v_T \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-9)$$

下標 $i, j = 1, 2, 3$ 為空間指標，模式常數 $c_\mu = 0.09$ ， $c_\varepsilon = 1.3$ ， $c_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $c_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $c_k = 1.0$ 皆是經由模式計算結果與實驗數據比對而得。三維流場中此模式有 7 個控制方程式，利用數值方法可求得 7 個未知數(3 個流速 \overline{U}_i ，壓力 \overline{P} ， k ， ε ， v_T)。

$k - \varepsilon$ 模式雖可用於計算非均質性紊流，但不適用於非等向性紊流。譬如十分靠近邊壁處，垂直於邊壁之紊流速度受到抑制而變小，水平向的紊流速度則不受影響，屬於非等向性紊流。故在計算邊界層流時，邊壁處需使用邊牆函數(Wall function)。

$k-\varepsilon$ 模式的缺點為：此模式假設動能消散率 ε 與大尺度渦流有關，而與最小渦流無關，但這假設與紊流能量消散的理論並不相符。

除了 $k-\varepsilon$ 模式之外，計算紊流流場的數值模式還包括大渦模式(Large Eddy Simulation, LES)、雷諾剪應力模式(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS)、紊流黏滯係數模式(Eddy viscosity model)等，這些紊流模式都較 $k-\varepsilon$ 模式更複雜，計算時間更長，需要更多的計算資源（電腦容量、記憶空間）。但因為數值模擬所需經費較實驗低，因此廣泛應用於各種風場問題。此種應用計算流體動力學於風工程的方式又稱為計算風工程(Computational Wind Engineering)或數值風洞(Numerical Wind Tunnel)，關於紊流模式的細節可參見朱佳仁（2006）。

此外，使用紊流模式計算室內風場必須注意：室內風場的雷諾數 Re 約為 1000~10,000，是介於層流(Laminar flow)和弱紊流流場(Weak turbulent flow)之間，計算此類的流場必須採用很細的計算格網(Computational mesh)，方能得到正確的計算結果。且建築物開口處往往有紗窗、百葉窗等，計算模式若不能模擬其阻滯氣流的效應，則計算結果將無法應用於實際的室內風場。

2. 多區塊模式(Multizone model)：

將室內空間依照其房間的隔間分為數個區塊(Zone)，將單一區塊當成一個完全混合(Fully mixed)的控制容積。依據質量不滅定律定理，區塊之內某物質濃度的變化必定是因為該物質流入（或流出）區塊或是因為該物質發生反應所造成的。同樣地，依據能量守恆定理，區塊之內溫度變化必定是因為有熱量流入或流出或是因為有熱源所造成的。因此計算在一段時間 Δt 之內，流入和流出區塊的物質總量和熱量總量便可得區塊內物質濃度和溫度的變化。此種模式又稱為網路模式(Network model)，譬如 CONTAM、COMIS、MMPN、POMA 模式(Feustel, 1999; Dascalaki et al., 1999; Ren and Stewart, 2003; Haghight et al., 2001)。其優點為計算簡單，但缺點為無法得知各個區塊之內的風場和濃度、溫度的分佈。

第三節 通風研究文獻

以下針對近年來國內外利用計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模式、多區間模式(Multizone model)、風洞實驗與實場監測等方式研究建築物通風的重要文獻做一個回顧：

1. 計算流體動力學模式：

周伯丞 (2000) 針對台灣地區的氣候環境，運用紊流模式配合全尺寸之環境實驗室的實測數據，針對室內風場及換氣量方面進行驗證比對。其研究結果顯示：標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式與低雷諾數 $k-\varepsilon$ 模式均可用來模擬強制對流之室內流場，然而就計算時間的考量，則以標準 $k-\varepsilon$ 模式所需要的計算時間較短。而台灣地區的春、秋季適合自然通風，可利用門窗之間的風壓差異，形成貫流通風，維持室內舒適性。且風壓通風之效果隨著室外風速增大而漸增。在冬季過冷時期，在夜間睡眠時段宜緊閉門窗以保溫，不利自然通風。

陳念祖 (2000) 採用 CFD 數值模式研究高架地板置換式自然通風方式對室內換氣效率之影響，並模擬穩態與暫態的室內氣流場和濃度場的模擬，配合小型風洞實驗檢驗所使用之高架孔隙式地板之特性，以及建築物外圍風場之模擬檢驗不同風速下受風面與背風面壓差關係，作為數值計算邊界條件之設定。研究結果顯示孔隙地板之面積比例會影響換氣次數的多寡，一般情況孔隙地板佔樓地板面積 4-6% 最有效率。傳統高氣窗方式之空氣交換效率僅達 36%，與置換式通風最佳之空氣交換效率 46% 相差近 10%，足以證明高架地板置換式通風方式之換氣效率優於傳統混合式之通風模式。

Allocca et al. (2003) 利用 $k-\varepsilon$ 紊流數值模式探討風壓和浮力合併作用下單側通風的流況，並提出一個半解析模式分析數值模式的結果。其研究成果顯示依據數值模式之結果計算換氣率 (ACH) 和半解析解相差約為 10%，但數值模式對於邊界條件如何設定非常敏感，且計算區域僅限於室內環境會造成極大的誤差，必須同時模擬室外與室內的風場。

Chang et al. (2003) 利用大渦流模式 (Large Eddy Simulation, LES) 模擬室外空氣污染物流入建築物內的問題，模擬十二種開口配置的形式，研究其室內、外空氣交換率和室外污染物在室內擴散的速率。迎風面設置開口為改善室內空氣品質的一個重要關鍵。而在側風面與背風面增設開口能有效地維持適當的空氣交換率，可幫助降低室內污染物的濃度。

Evola and Popov (2006) 利用 $k-\varepsilon$ 紊流模式和重整化群 (Renormalization Group, RNG) 模式研究風壓通風的問題，流況包括貫流通風和單側通風。兩模式計算結果與風洞實驗之數據比較後發現： $k-\varepsilon$ 紊流模式的計算結果誤差較大，重整化群模式的結果則較接近實測之通風量。

Chang (2006)和張瑋如 (2006)利用 $k-\varepsilon$ 紊流數值模式探討室外植栽風擋對於兩層樓建築物貫流通風的影響，研究結果發現靠近建築物設置植栽對二樓不但沒有遮蔽效應，反而在植栽的孔隙率較大時會產生比原本更強勁的風速，故圍籬應避免太靠近建築物。植栽的孔隙率過低時，則會產生逆向通風的現象，造成循環氣流或停滯氣流、通風不佳的效果。

蘇裕民 (2006)利用計算流體動力學(CFD)數值模式探討小型建築中庭的浮力通風問題，研究成果發現室外無風時，中庭開口面積、開口高差的增加會增大換氣率。在室外有風且室外風速小於 1.5~2.0 m/s 時，會形成風壓與浮力換氣路徑相反的現象，削弱室內浮力通風的效果；當室外風速達到 2.0 m/s 時，風壓通風會大於浮力通風，中庭內的通風路徑則由風壓通風主導。

秦子傑 (2006)利用風洞實驗和 $k-\varepsilon$ 紊流模式研究垂直通風管的實際效能，其方式先利用風洞實驗驗證、比對數值模式之結果。待比對完成後，再將風洞試驗段重建於數值模式中，探討其他變因對通風管流況的影響。本研究證實垂直通風管是一種有效的自然通風設備，此種通風方式適合應用於室內通風量不足的空間中，經實驗證實通風管外形、室內發熱量、與開口內外壓力差皆會影響通風管的換氣效果。並建議採用非穩態方式方能精確地模擬實際氣流狀況。

何明錦和鍾基強(2007)針對不同空調風口配置對室內空間氣流環境之影響進行探討，利用 CFD 進行室內空間氣流與濃度分佈的模擬分析，配合全尺寸實驗進行空間的氣體污染物分佈實測，比較兩者的差異性。此研究發現要維持或改善建築物室內之空氣品質，除本身之空氣調節與通風設備扮演重要角色之外，也受到外氣通風量大小的影響，而空調通風口之相對配置所形成之氣流路徑對室內空氣品質影響更為顯著，因此進行建築物之空調通風系統設計或配置，除了所需求之通風量外風口設置之位置，還須考慮適當之風口設計位置。

陳念祖 等(2007)以單側及側向開口模式為探討對象，針對開口裝設水平及垂直導風板對自然通風效益之影響。研究方法運用計算流體力學(CFD)數值模擬方式進行，配合全尺模型實驗檢證數值模式之可信度，研究結果顯示：(1)單側開口裝設水平導風板模式時，9 cm 以上水平導風板有助於提升單側通風時之換氣率，並隨導風板深度而遞增，尤其當外部風速小的時候較為明顯，若綜合考量各評估項目，導風板深度以 18~48 cm 為較佳的選擇。(2)側向開口裝設垂直導風板模式，在外部風速 (0.5~2.0 m/s) 條件下，當風向平行於建築物開口時，裝設垂直導風板之平均換氣

次數約可較無導風板者增加 260%，其中以導風板角度 45° 較佳。當風向與建築立面成 45° 時，導風板角度 $0^\circ\sim 22.5^\circ$ 有利於室內流場均勻。綜合評估後，依照不同風向提出最佳化的垂直導風板角度調變模式。

劉妮君 (2007) 利用 $k-\varepsilon$ 模式、零方程式 (Zero equation)、層流數值模式和縮尺模型實驗研究中庭建築之通風性能，結果顯示在室外無風狀態下，室外溫度對室內溫度場影響甚鉅。欲藉由室內產生之熱量 (內部負荷) 驅動的浮力通風，其降溫效果並不顯著，必須輔以其他自然通風 (風壓通風) 或機械設備來達成室內降溫之目的。而開口位置所形成之換氣路徑愈直接則降溫效果愈佳，開口數量愈多亦能改善室內熱環境，但影響之程度有限；當室外溫度超過 30°C 時，天窗設置之影響不顯著。

吳玉婷 (2010) 以成功大學的綠色魔法學校為案例，利用計算流體力學 (CFD) 及縮尺模型實驗研究太陽能煙囪 (Solar chimney) 對熱浮力通風之影響。研究結果發現在夏季及春秋兩季的狀態下，太陽能煙囪的通風量皆遠大於法定換氣量，符合基本換氣需求。但對人體熱舒適而言，太陽能煙囪在春秋季適用性較夏季高，當春秋季室外氣溫 26°C 時，其室內溫度介於 $26\sim 27.2^\circ\text{C}$ ，自然通風可產生室內風速 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ ，約可降溫 $0.5\sim 1.1^\circ\text{C}$ ，符合春秋季 90% 群眾可接受之溫度 $23.5\sim 28.5^\circ\text{C}$ ，而夏季室外氣溫 30°C 時，室內溫度則只符合 80% 群眾可接受之溫度。該研究亦發現室外風速可增加通風效益，在相同之室內發散熱設定下，室外有風比無風狀態的通風量增加約 13.4~22.2%，其中以春秋季下午增加最多，夏季上午增加最少。

2. 多區間模式：

Dascalaki et al. (1999) 比較利用多區間模式 COMIS 與實場監測來預測建築物單側通風與貫流通風的通風量，此研究設定室內隔間之門窗的流量係數 C_d 為 0.65，當室外風場為均勻流時，室內風壓會隨風速上升而遞增，且通風量維持定值，對於單側通風而言，在低風速的情況下 COMIS 模式預測結果會比在高風速的情況下好，此外，當室內隔間開口很大的時候，COMIS 模式預測與實場監測的結果非常相似。

Tan and Glicksman (2005) 探討大型通風建築的自然通風，其中包括了浮力通風與風壓通風，然後利用 CFD 與多區間模式 MMPN (Multi-zone Model Program) 進行自然通風的預測比較。研究所模擬的建築物為實體尺寸的大尺度比例，而研究中所使用的流量係數 C_d 在小型開口為 0.95，在大型開口或窗戶則為 0.7。研究中主要探討關於中庭的設計，若將中庭分割成數塊區塊則會對 MMPN 的計算結果造成影響，而其

計算結果比無分割之中庭的散熱效果還好，且至少要將中庭分割成兩塊區域。

Haghighat et al. (2001)提出了一個可以計算房間中風場與溫度分佈的多區間模式POMA (Pressurized zonal Model with Air-diffuser)。此研究以模擬天花板通風口的射流路徑與其室內的風場跟溫度分佈為案例，用以證實POMA模式的可信度。而POMA模式也可以提供一些關於熱能方面對於室內環境品質影響的資訊，也可以應用於室內格局與隔間高度的設計、空氣擴散等的研究。

朱佳仁(2011)等發展一個通風模式TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，可用以計算多區間建築物之通風量。模式利用中央氣象局1961 ~ 2008年間中央氣象局全台26個地面氣象站的氣象資料(平均風速、盛行風向、氣溫、濕度等)，建立成一個氣象資料庫，並利用風洞實驗量測矩形建築物在各風向角之下的表面風壓，將量測值建立成一個資料庫以供計算建築物風壓通風之用。模式可輸入建築物外型、座向、開口位置、大小及室內隔間等參數便可計算建築物風壓通風的換氣量，進而評估一般建築物可使用風壓通風的時段。對於尚未興建之建築物，亦可利用TAIVENT模式計算有利風壓通風之建築設計。

3. 風洞實驗：

風洞實驗室內之儀器設備，因為控制性佳，可重複性高，且量測之數據可供數值驗證之用。因此可以在實驗室內，針對特定的風場現象，就其中重要的參數進行一系列的實驗，來研究這些參數如何影響風場及其內在的機制，做學術上的探討。譬如Ohba et al. (2001)利用裂膜(Split film)探針量測前後皆有開口之通風模型中的室內流場。研究顯示氣流在進入模型之中，因受到模型外迎風面前的渦流影響而向下流動，並在模型內形成逆時針方向的循環渦流，由背風面開口離開模型的氣流會因為外部流場的逆流而向上流動。而外部來流入射角範圍在 40° ~ 60° 之間，流場在開口處的動壓會因為其分離流加速的影響隨著入射角角度增加而增加，導致通風流量也隨之增加。在迎風面開口的長寬比為1:2的情況下，風向角在 0° ~ 80° 之間，則流量係數 $C_z = 0.7$ 幾乎不變。

陳若華 等(2001)研究建築群配置方式對自然通風之影響，並利用風洞實驗量測建築模型在不同排列下的表面風壓，並分析台灣地區北中南東六大都會區之平均氣象年資料，經由逐時的計算結果，評估各地區自然通風的潛勢，對於有利於配置方式作成建議。

Chu et al. (2009)利用理論分析和風洞實驗研究室外紊流風場對無隔間建築物貫流通風之影響，探討不同的風向、風速、外部開口形狀對於貫流通風的影響。風洞實驗結果發現：在高雷諾數的狀況下，開口的流量係數 C_z 不會隨室外風速、風向、開口形狀而變，可視為定值。但低雷諾數的狀況下，流量係數 C_z 不隨室外風速而變，但會隨雷諾數、風向而變。由實驗數據迴歸分析，可建立各種狀況、雷諾數之流量係數的計算公式。本研究並利用流體力學原理推導得一個風壓平衡模式，可由室外風壓係數和開口的流量係數求得室內風壓係數和通風量，此模式並經由風洞實驗予以驗證。換言之，此模式不需要使用複雜的計算流體動力學(CFD)模式便可預測各種狀況下建築物的通風量。

朱佳仁 等 (2009)藉由風洞實驗研究窗戶開口的加裝物(百葉窗、紗窗或不透風式外推窗)對貫流通風之影響，實驗結果發現：在相同的室內外壓差之下，百葉窗、紗窗及外推窗等加裝物皆會增加空氣流通的阻力，導致通風流量及流量係數會小於無加裝物之開口。且百葉窗的傾斜角愈大，阻力愈大，流量係數愈小。

Chu et al. (2010)採用理論分析及風洞模型實驗的方式來探討室內隔間對貫流通風的影響，研究參數包括室內隔間的方式、室內開口的大小、位置與厚度對通風量的影響，通風量和開口的流量係數利用流量計來量測。實驗結果發現室內開口的流量係數為開口面積的函數，但與雷諾數、內外牆厚度、室外開口大小與位置無關。研究也發現了當迎風面與背風面開口面積相同時，通風量會最大，且此通風量會隨室內開口的變大而變大。本研究並依據連續方程式和孔口流量公式建立一個預測模式來計算隔間建築物的風壓通風之通風量，風洞實驗的結果驗證了此預測模式，此模式可供建築設計者未來在評估、規劃建築物自然通風之用。

Chu and Wang (2010)提出一個阻抗模式計算有室內隔間風壓通風之通風量，並利用理論分析推導出室內開口的流量係數和阻抗係數的關係，而阻抗係數需由風洞實驗決定。實驗結果發現室內隔間之阻抗係數與室內開口面積成反比，開口面積愈小，阻抗係數愈大，通風量愈小。研究結果亦發現開口未全開的門會增加氣流流經開口的阻抗，換言之，通風量會變小。此阻抗模式也可計算室內有大型傢俱對風壓通風之影響。

Chu et al. (2011)利用風洞模型實驗和示蹤氣體(Tracer gas)濃度法量測在不同風速、風向下，無室內隔間建築物，單側開口及雙側開口的換氣率。實驗結果發現當風向平行於開口時，開口處的風剪力會驅使室內外空氣交換，室外風速愈大，

風剪力愈強，換氣率愈大。在此風向下，雙側開口的換氣率為單側開口換氣率的五倍。依據實驗結果可歸納出一個無因次換氣率的預測方式，可用計算單側開口的換氣率。

除了風洞實驗之外，Hunt and Linden (1999)利用水槽實驗研究熱浮力與風壓同時作用下的自然通風，實驗結果十分接近理論預測之通風率。其研究結果指出通風率可以下式計算：

$$Q = A^* \left(\frac{|\Delta P \pm \Delta \rho \cdot g \cdot h|}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2-10)$$

式中 A^* 為有效開口面積， $\Delta \rho$ 為密度差異， g 為重力加速度， h 為室內密度界面離高處開口之距離， $\Delta P = P_1 - P_2$ 為迎風面與背風面開口之壓差。當壓差 $\Delta P \gg \Delta \rho g h$ 時，風壓為通風量主要的影響參數，但當 $\Delta P \ll \Delta \rho g h$ 時，熱浮力主導通風。

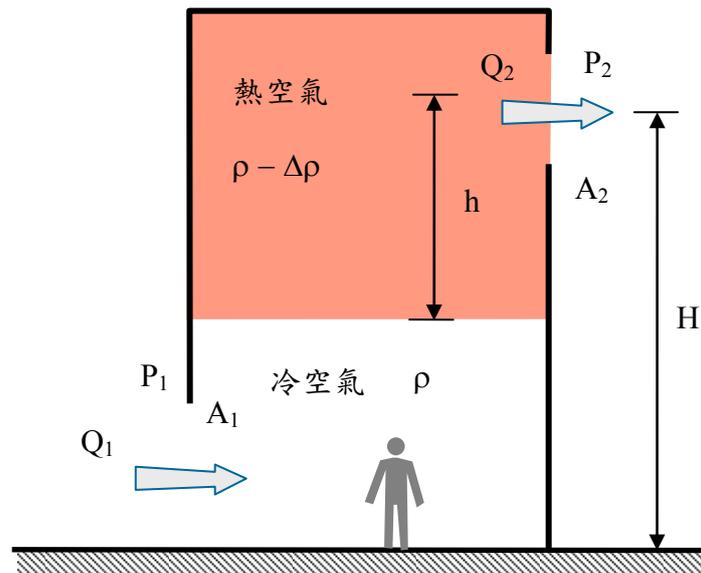


圖2-4 計算浮力通風之示意圖

資料來源：本研究整理

有效開口面積 A^* 為：

$$A^* = \frac{A_1 \cdot A_2}{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{A_1^2}{C_{d2}^2} + \frac{A_2^2}{C_{d1}^2} \right) \right]^{1/2}} \quad (2-11)$$

式中A為開口面積， C_d 為流量係數(Discharge coefficient)，下標1、2分別代表迎風面、背風面開口。

黃俊傑(2010)亦利用水槽實驗研究兩連接房間之浮力通風機制研究，其實驗結果顯示：依據浮力通風的驅動力及建築物中央隔板上下開口的位置，可分為推式及拉式兩種換置式通風，拉式浮力通風是由浮力源房間將熱空氣排出至室外，再將無浮力源房間的空氣拉入補充至浮力源房間；推式浮力通風則是室外空氣由浮力源房間對外開口進入，浮力源房內的熱空氣再由中央隔板的開口流至無浮力源房間。此研究亦應用浮力通風於實體建築物的設計，並建議各房間通風的改善方案。

4. 實場監測：

實場調查為瞭解實際風場最直接的方式，且實場量測來獲得實驗資料是最具說服力。江哲銘等(2001)監測台灣地區六棟辦公建築物的換氣率，其結果顯示：上班時間其平均之換氣率為1.44 ACH，較一般住宅的換氣率高。Gao et al. (2009)利用示蹤氣體法量測一棟單側開口的實體建築物的換氣率，結果並與CFD模擬結果比較。Tung et al. (2009)利用示蹤劑法研究在機械通風的狀況下，去除廁所內臭味的最佳進風口、出風口之位置。但實場量測所需的人力、經費和時間較多。加上自然界風速、風向與時俱變，且建築物外型、配置、開口位置等會影響建築物自然通風的因素太多、太複雜，往往不易由實場監測結果深入瞭解自然通風現象背後的機制。

綜觀以上的研究，可以發現大多的研究皆針對某一個特殊的流況探討其通風量或換氣率，建築設計者若不熟悉這些研究成果，很難應用這些成果來計算建築物各種狀況下的通風量或換氣率。本研究整理前人研究的浮力通風計算公式，建構一個適用於台灣建築物的TAIVENT通風模式。模式預測之通風換氣率將以風洞實驗之數據來驗證，風洞實驗預備使用內政部建築研究所的風洞實驗室來進行，利用多頻道壓力掃描計量測壓克力縮尺模型的表面風壓值。此通風模式將可提供國內建築設計者在規劃建築物自然通風之參考，進而有效的協助建築師在設計建築物時達到節能、減碳的目的，並期望能改善台灣本土建築室內空氣品質與通風環境。

第三章 台灣氣象資料

在評估浮力通風對於台灣建築物的適用性之前，必須先瞭解台灣各地的氣候特性，因此本章針對台灣的氣象資料進行統計分析。中央氣象局在台灣及離島共設有 25 個人工觀測地面氣象測站，有長時間完整的逐時風速、風向、溫度與相對濕度資料紀錄。雖然這些氣象測站不能涵蓋全台灣各地的氣象變化，但其量測儀器有定期維修、校正，資料可信度較佳。氣象測站名稱、站號海拔、風速計距當地地面高度、設立時間等資料如表 3-1 所示，圖 3-1 為中央氣象局所屬氣象測站位置分佈圖。

本計畫分析中央氣象局 25 個測站 1961 ~ 2008 年共 48 年的溫度與相對濕度資料。經統計分析可求得各測站風向、風速的發生機率與平均風速、溫度與相對濕度，其結果於表 3-3 所示。計算各地氣象參數所使用之資料量的多寡會影響到計算結果，當氣象資料的樣本數太少時，所得的統計參數可能不具代表性，依據本研究之結果，建議風速資料至少須有 20 年之逐時的風速、風向記錄。

本研究並針對台北、台中、台南、高雄等四個都會地區的氣象資料，分析 1961 ~ 2008 年的溫度和相對濕度，以瞭解各地的氣候狀況在不同月份的變化情況。圖 3-2 顯示台北市春季平均氣溫的逐時變化，由圖中可以看出氣溫日夜的變化，而下午一點的溫度為最大值，此外日間平均氣溫為 23.15 °C，夜間平均氣溫為 20.57 °C，日夜溫差平均值為 2.58 °C，如表 3-4 所示。台灣春季平均溫度不到 25 °C，算是滿舒適的環境，僅使用自然通風或是風扇即可，無須使用到冷氣。

圖 3-3 為台北市春季平均相對濕度(R.H.)逐時的變化，圖中說明了日間的相對濕度小於夜間的相對濕度，相對濕度最大值發生在凌晨五點及六點的時候，平均值為 86 %，而最小值發生在正午十二點，平均值為 69 %，這是因為相對濕度為空氣中實際蒸汽壓 e_a 與飽和蒸汽壓(Saturation vapor pressure)之比值：

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \quad (3-1)$$

當白天中午氣溫高時，飽和蒸汽壓 e_s 上升，導致相對濕度下降。而夜間溫度下降時，飽和蒸汽壓亦隨之下降，導致相對濕度上升。

表3-1 中央氣象局所屬地面氣象站資料表(1999)

| 測站 | 站號 | 創立年份 | 風速計 高度(m) | 海拔高 度 (m) | 東經 | 北緯 | α | δ (m) |
|-----|--------|------|--------------|--------------|--------------|-------------|----------|-----------------|
| 彭佳嶼 | 466950 | 1909 | 12.50 | 101.7 | 122° 04' 17" | 25° 37' 46" | 0.110 | 233 |
| 鞍部 | 466910 | 1937 | 7.31 | 837.6 | 121° 31' 13" | 25° 11' 11" | 0.110 | 233 |
| 竹子湖 | 466930 | 1937 | 11.03 | 607.1 | 121° 32' 11" | 25° 09' 54" | 0.250 | 400 |
| 淡水 | 466900 | 1942 | 12.20 | 19.0 | 121° 26' 24" | 25° 09' 56" | 0.150 | 300 |
| 基隆 | 466940 | 1946 | 34.60 | 26.7 | 121° 43' 56" | 25° 08' 05" | 0.250 | 400 |
| 台北 | 466920 | 1896 | 34.90 | 5.3 | 121° 30' 21" | 25° 02' 21" | 0.250 | 400 |
| 新竹 | 467570 | 1938 | 15.60 | 26.9 | 120° 58' 11" | 24° 48' 08" | 0.194 | 350 |
| 宜蘭 | 467080 | 1935 | 26.00 | 7.2 | 121° 44' 53" | 24° 45' 56" | 0.150 | 300 |
| 台中 | 467490 | 1896 | 17.20 | 84.0 | 120° 40' 33" | 24° 08' 51" | 0.250 | 400 |
| 梧棲 | 467770 | 1976 | 33.20 | 7.2 | 120° 30' 54" | 24° 15' 31" | 0.130 | 267 |
| 花蓮 | 466990 | 1910 | 12.00 | 16.1 | 121° 36' 18" | 23° 58' 37" | 0.173 | 321 |
| 日月潭 | 467650 | 1941 | 8.00 | 1014.8 | 120° 53' 60" | 23° 52' 59" | 0.150 | 300 |
| 澎湖 | 467350 | 1896 | 14.60 | 10.7 | 119° 33' 19" | 23° 34' 02" | 0.150 | 300 |
| 阿里山 | 467530 | 1933 | 15.10 | 2413.4 | 120° 48' 18" | 23° 30' 37" | 0.110 | 233 |
| 嘉義 | 467480 | 1968 | 14.50 | 26.9 | 120° 25' 28" | 23° 29' 52" | 0.167 | 313 |
| 玉山 | 467550 | 1943 | 9.20 | 3844.8 | 120° 57' 06" | 23° 29' 22" | 0.150 | 300 |
| 東吉島 | 467300 | 1962 | 9.10 | 43.0 | 119° 39' 35" | 23° 15' 32" | 0.125 | 260 |
| 成功 | 467610 | 1940 | 12.80 | 33.5 | 121° 21' 55" | 23° 05' 57" | 0.144 | 245 |
| 台南 | 467410 | 1897 | 37.60 | 8.1 | 120° 11' 49" | 22° 59' 43" | 0.218 | 378 |
| 台東 | 467660 | 1901 | 11.40 | 9.0 | 121° 08' 48" | 22° 45' 15" | 0.150 | 300 |
| 高雄 | 467440 | 1931 | 14.00 | 2.3 | 120° 18' 29" | 22° 34' 04" | 0.150 | 300 |
| 大武 | 467540 | 1940 | 12.70 | 8.1 | 120° 53' 45" | 22° 21' 28" | 0.244 | 407 |
| 蘭嶼 | 467620 | 1941 | 12.50 | 324.0 | 121° 33' 02" | 22° 02' 19" | 0.110 | 233 |
| 恆春 | 467590 | 1896 | 14.30 | 21.9 | 120° 44' 17" | 22° 00' 20" | 0.194 | 350 |
| 蘇澳 | 467060 | 1981 | 34.00 | 24.9 | 121° 51' 52" | 24° 36' 06" | 0.150 | 300 |

資料來源：本研究整理

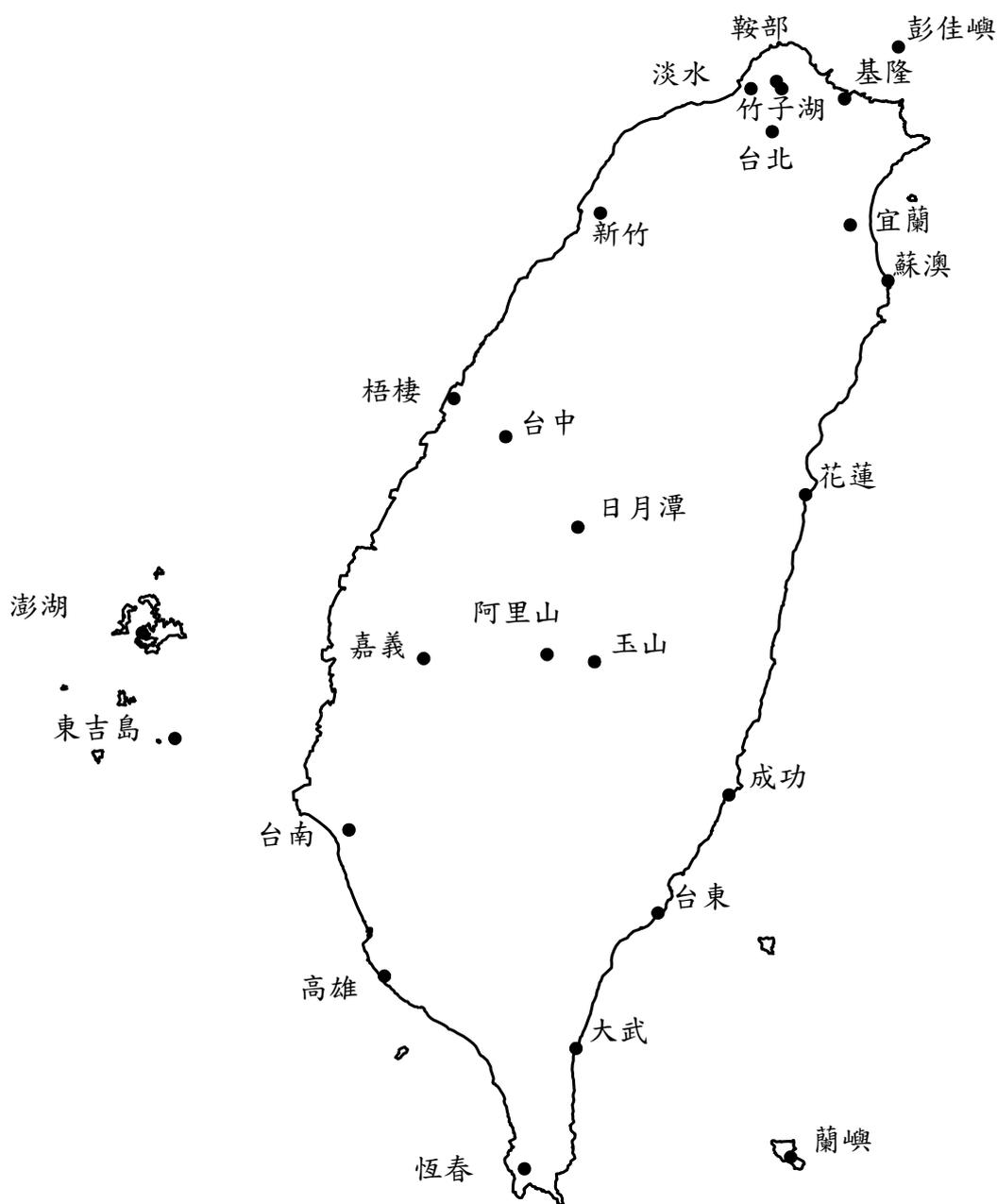


圖 3-1 中央氣象局氣象站位置圖

資料來源：本研究整理

表 3-2 台灣地區人工觀測氣象站之 48 年平均氣象資料

| 測站 | 站號 | 平均風速 (m/s) | 平均溫度 (°C) | 平均相對 濕度(%) | 盛行風向 |
|-----|--------|---------------|--------------|---------------|------|
| 彭佳嶼 | 466950 | 7.68 | 21.90 | 82 | 東風 |
| 鞍部 | 466910 | 3.49 | 16.84 | 90 | 南風 |
| 竹子湖 | 466930 | 2.21 | 18.63 | 87 | 東北風 |
| 淡水 | 466900 | 2.41 | 22.20 | 80 | 東北風 |
| 基隆 | 466940 | 3.44 | 22.55 | 79 | 東北風 |
| 台北 | 466920 | 3.15 | 22.71 | 78 | 東風 |
| 新竹 | 467570 | 2.68 | 22.37 | 79 | 東北風 |
| 宜蘭 | 467080 | 1.78 | 22.43 | 83 | 靜風 |
| 台中 | 467490 | 1.64 | 23.08 | 77 | 北風 |
| 梧棲 | 467770 | 5.03 | 22.99 | 77 | 北風 |
| 花蓮 | 466990 | 2.54 | 23.24 | 79 | 西南西風 |
| 日月潭 | 467650 | 1.15 | 19.19 | 83 | 靜風 |
| 澎湖 | 467350 | 4.63 | 23.42 | 82 | 北北東風 |
| 阿里山 | 467530 | 1.45 | 10.98 | 87 | 西風 |
| 嘉義 | 467480 | 2.30 | 23.03 | 81 | 北風 |
| 玉山 | 467550 | 5.65 | 4.08 | 75 | 西風 |
| 東吉島 | 467300 | 8.07 | 23.62 | 82 | 北北東風 |
| 成功 | 467610 | 3.47 | 23.71 | 79 | 北北東風 |
| 台南 | 467410 | 3.17 | 24.14 | 78 | 北風 |
| 台東 | 467660 | 2.64 | 24.31 | 75 | 北北西風 |
| 高雄 | 467440 | 2.42 | 24.77 | 77 | 北風 |
| 大武 | 467540 | 2.76 | 24.84 | 75 | 北北東風 |
| 蘭嶼 | 467620 | 8.38 | 22.66 | 89 | 北北東風 |
| 恆春 | 467590 | 3.59 | 25.15 | 76 | 東北風 |
| 蘇澳 | 467060 | 2.71 | 22.64 | 80 | 西風 |

資料來源：本研究整理

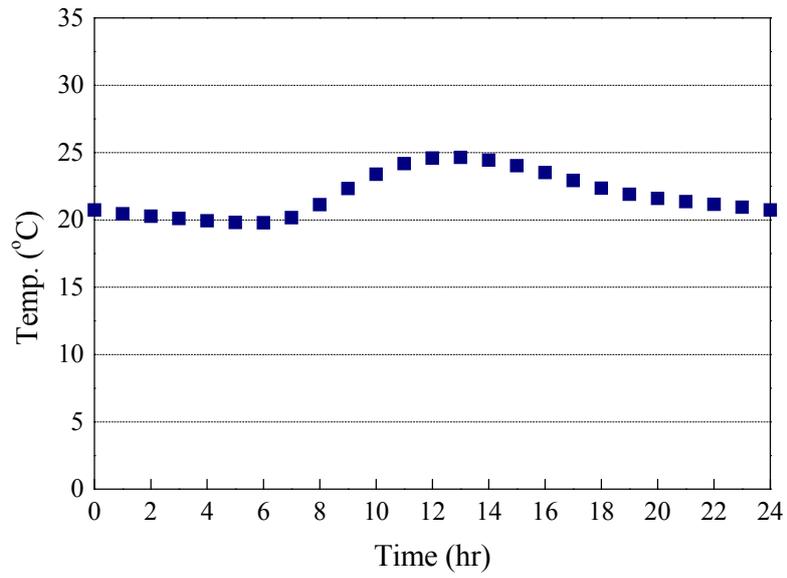


圖 3-2 台北市春季平均溫度的逐時變化圖 (3~5 月)

資料來源：本研究整理

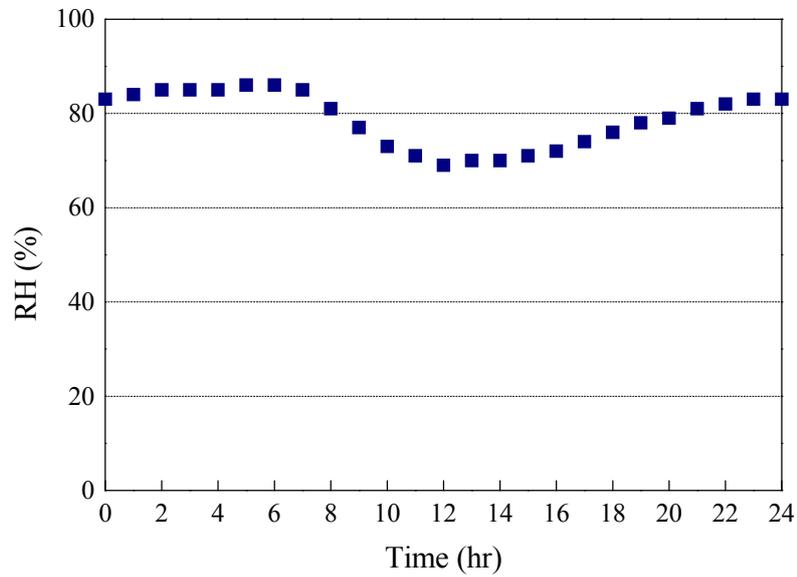


圖 3-3 台北市春季平均相對濕度的逐時變化圖 (3~5 月)

資料來源：本研究整理

表 3-3 台北市各月份平均氣象資料表

| 月份 | 平均風速 (m/s) | 最大風速 (m/s) | 平均氣溫 (°C) | 平均相對 濕度(%) | 主要風向 |
|-----|---------------|---------------|--------------|---------------|--------|
| 1 | 2.83 | 9.6 | 15.02 | 74 | 東北東風 |
| 2 | 2.70 | 9.4 | 15.05 | 74 | 東風 |
| 3 | 2.69 | 11 | 16.97 | 73 | 東風 |
| 4 | 2.61 | 10 | 20.44 | 72 | 東風 |
| 5 | 2.51 | 10.5 | 23.35 | 72 | 東風 |
| 6 | 2.05 | 10 | 25.43 | 73 | 東風 |
| 7 | 2.22 | 16.5 | 27.26 | 68 | 南南東風 |
| 8 | 2.41 | 15.5 | 26.95 | 69 | 南南東風 |
| 9 | 2.93 | 14.9 | 25.56 | 72 | 東北東風 |
| 10 | 3.33 | 13.7 | 22.94 | 71 | 東北東風 |
| 11 | 3.30 | 10.8 | 19.99 | 72 | 東北東風 |
| 12 | 2.99 | 8.8 | 16.83 | 72 | 東北東風 |
| 年平均 | 3.15 | 16.5 | 22.71 | 78 | 東北東或東風 |

資料來源：本研究整理

圖 3-4 為台北市夏季平均氣溫的逐時變化，圖中顯示中午十二點的溫度為最大值，日間平均氣溫為 30.35 °C，夜間平均氣溫為 27.05 °C，日夜溫差平均值為 3.3 °C。圖 3-5 顯示台北市夏季逐時平均相對濕度(R.H.)的變化，類似春季的濕度變化，日間的相對濕度小於夜間的相對濕度，相對濕度最大值發生在凌晨五點的時候，平均值為 85%，而最小值發生在中午十二點，平均值為 64%，相差了 21%之多。

圖 3-6 顯示了台北市秋季平均氣溫的逐時變化，由圖中可以看出氣溫日夜的變化，而下午一點的溫度為最大值，日間平均氣溫為 25.46 °C，夜間平均氣溫為 23.2 °C，日夜溫差 2.26 °C。圖 3-7 顯示台北市秋季相對濕度(R.H.)的變化，圖中說明了日間的相對濕度小於夜間的相對濕度，相對濕度最大值發生在凌晨五點及六點的時候，平均值為 83%，而最小值發生在正午十二點到下午兩點，平均值為 68%，相差 15%。

圖 3-8 為台北市冬季平均氣溫的變化圖，由此圖可以看出氣溫日夜的變化，而下午一點的溫度為最大值，日間平均氣溫為 17.7 °C，夜間平均氣溫為 15.8 °C，日夜溫差 1.9 °C。圖 3-9 顯示台北市冬季相對濕度(R.H.)的變化，圖中說明了日間的相對濕度小於夜間的相對濕度，相對濕度最大值發生在凌晨兩點到七點的時候，平均值為 84%，而最小值發生在下午一點，平均值為 70%。台北市春、夏、秋、冬四季逐時及日夜相對濕度列於 3-4 - 3-7，由表中數據可看出台北市平均相對濕度皆大於 60%。

圖 3-10 為台北、台中、台南、高雄的月平均溫度比較圖，由圖中可看出各測站在不同月份的氣溫變化介於 15 ~ 30 °C 之間，最高月平均溫度皆發生在七月，最低月平均溫度皆在一月。而南北最大溫差皆發生冬季(一月、二月、十二月)，台北最冷，高雄最熱，相差約 4 °C。但夏季(七月、八月)各地的溫差並不大。高雄的全年平均溫度最高，達 24.7 °C。圖 3.11 為台北、台中、高雄、台南的月平均相對濕度之比較圖，各測站月平均相對濕度介於 75 ~ 85 % 之間，皆屬於高濕度的情況。在夏季期間高雄的相對濕度最高，台北濕度最低，而在冬季期間台北的濕度最高，高雄最低。經由統計可知：台北全年平均相對濕度最高，達 78.5%。

圖 3-12、3-13、3-14、3-15 為台北、台中、台南、高雄全年平均之風花圖，由圖中可知：每個地區的盛行風向都有所不同，且發生機率在 10% 以上的風向不只一種，也就是說每個地區常見的風向至少有兩種，並不是只有單一風向。

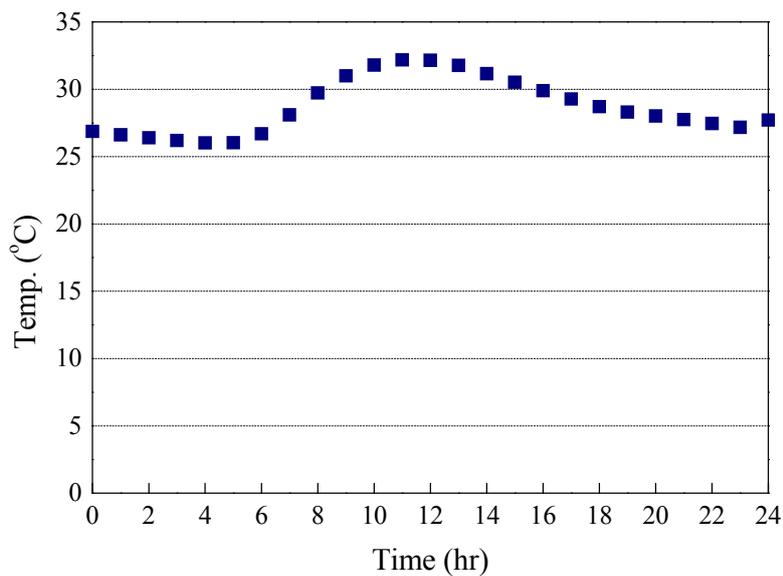


圖3-4 台北市夏季平均溫度的逐時變化圖 (6~8月)

資料來源：本研究整理

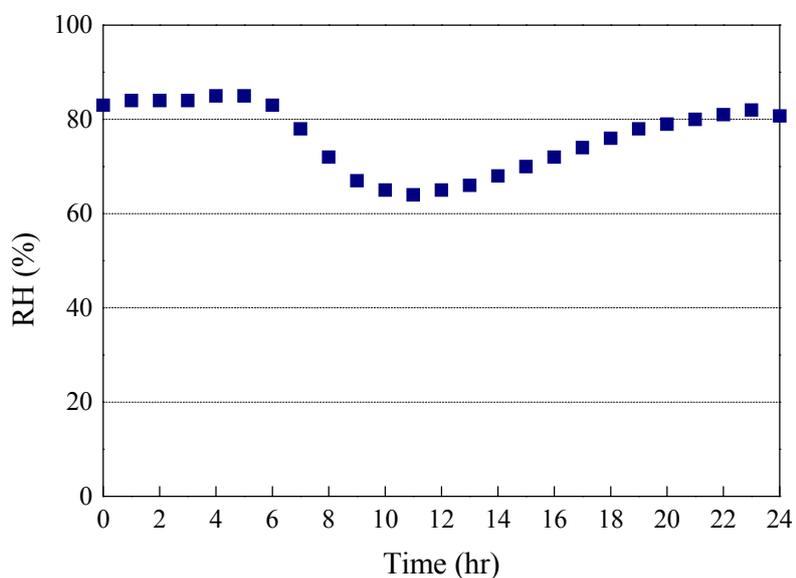


圖3-5 台北市夏季平均相對濕度的逐時變化圖(6~8月)

資料來源：本研究整理

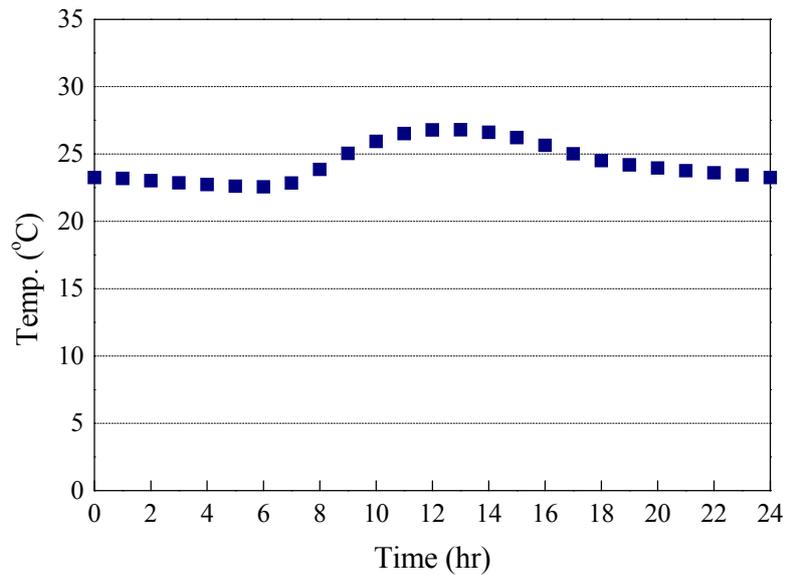


圖3-6 台北市秋季平均溫度的逐時變化圖 (9 ~ 11月)

資料來源：本研究整理

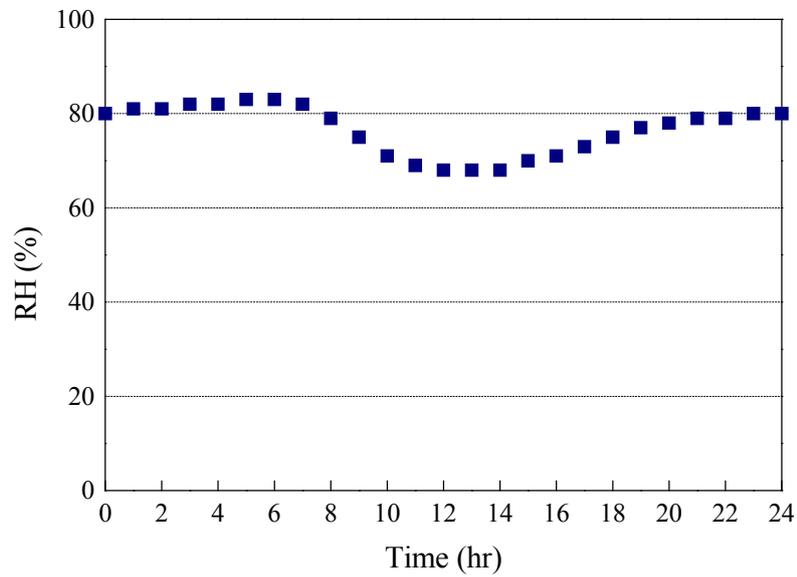


圖3-7 台北市秋季相對濕度的逐時變化圖(9 ~ 11月)

資料來源：本研究整理

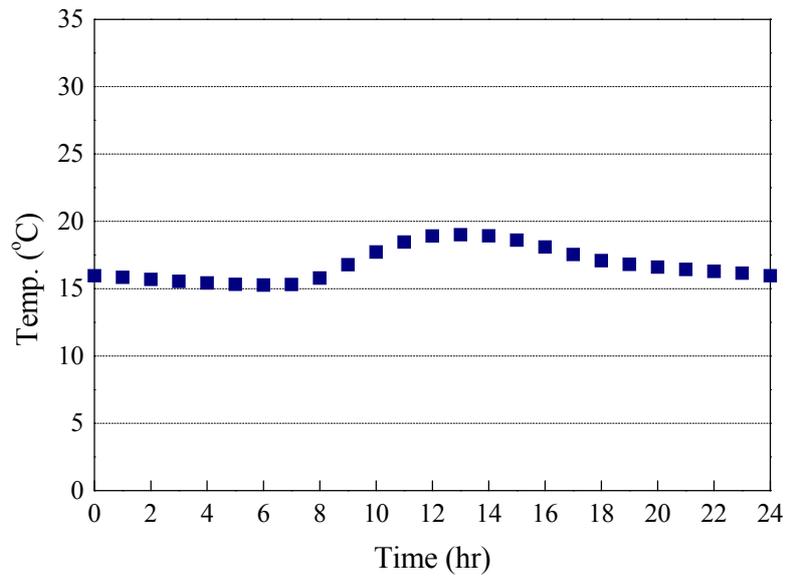


圖 3-8 台北市冬季平均溫度的逐時變化圖 (12 ~ 次年 2 月)
資料來源：本研究整理

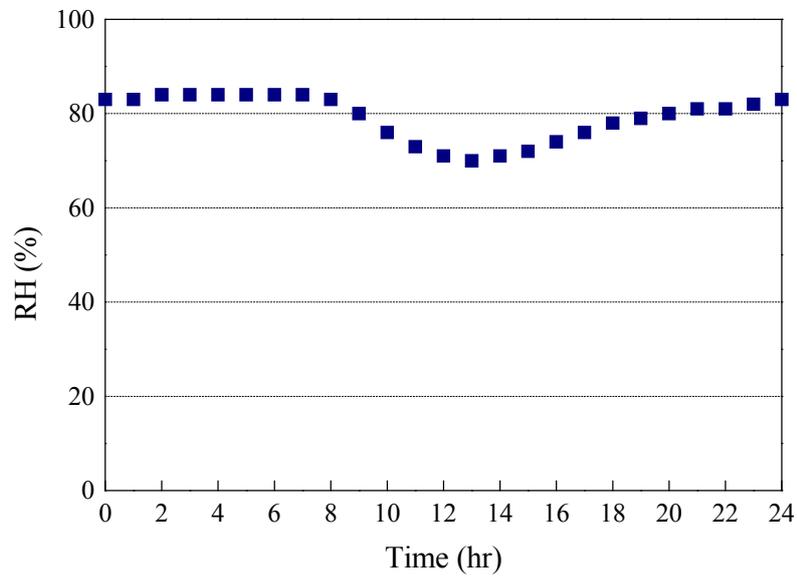


圖3-9 台北市冬季平均相對濕度的逐時變化圖(12 ~ 次年2月)
資料來源：本研究整理

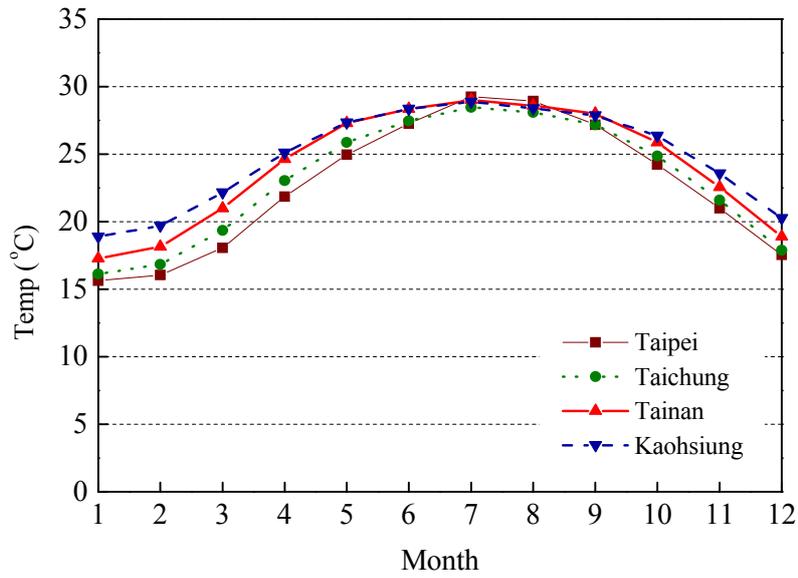


圖3-10 台北、台中、台南、高雄月平均溫度之比較圖

資料來源：本研究整理

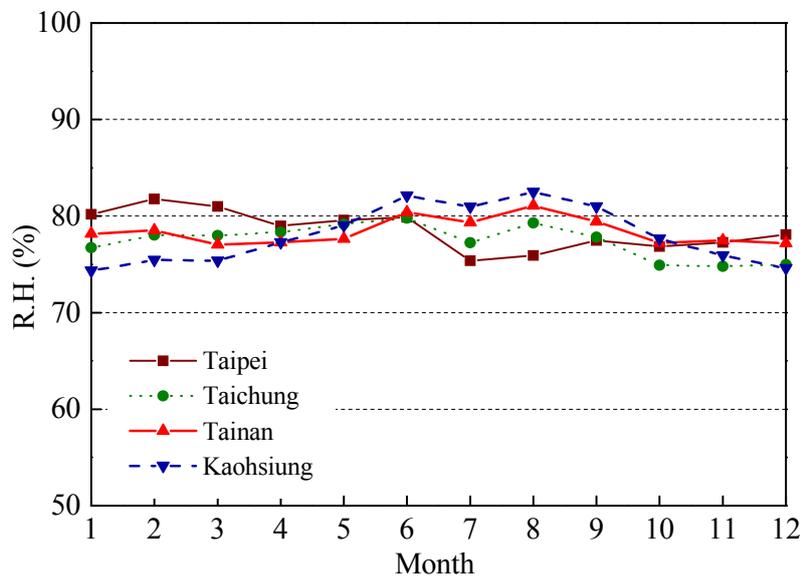


圖3-11 台北、台中、台南、高雄月平均相對濕度之比較圖

資料來源：本研究整理

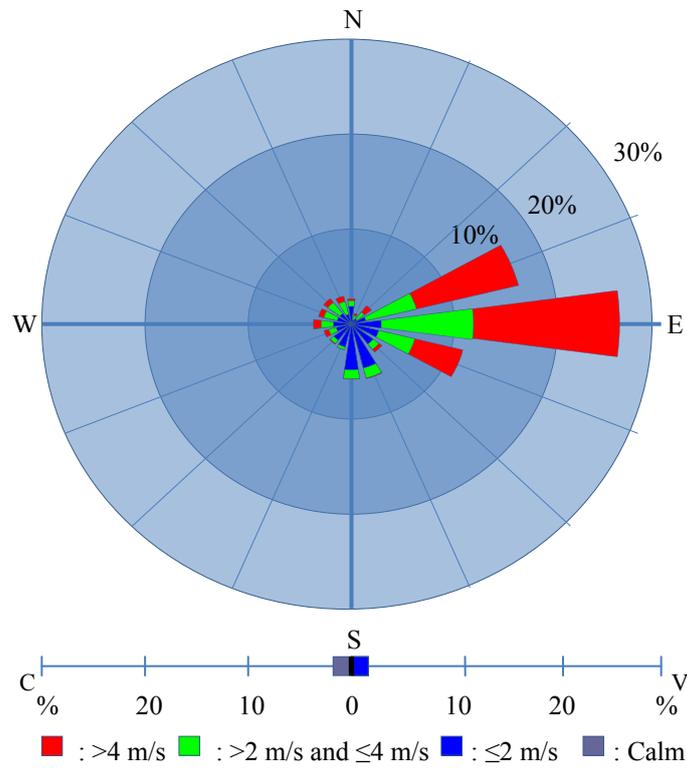


圖3-12 台北全年平均之風花圖

資料來源：本研究整理

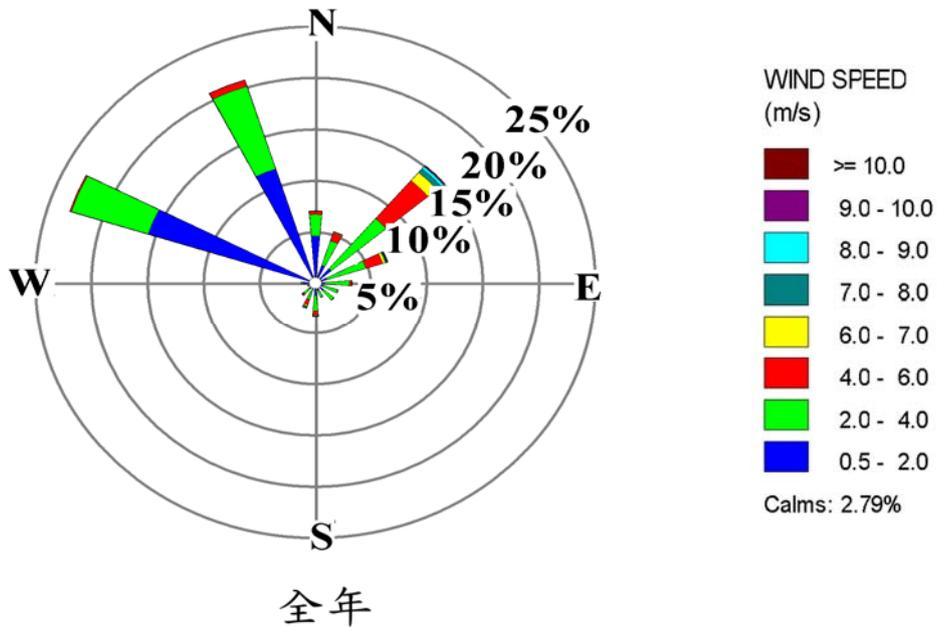


圖3-13 台中全年平均之風花圖

資料來源：本研究整理

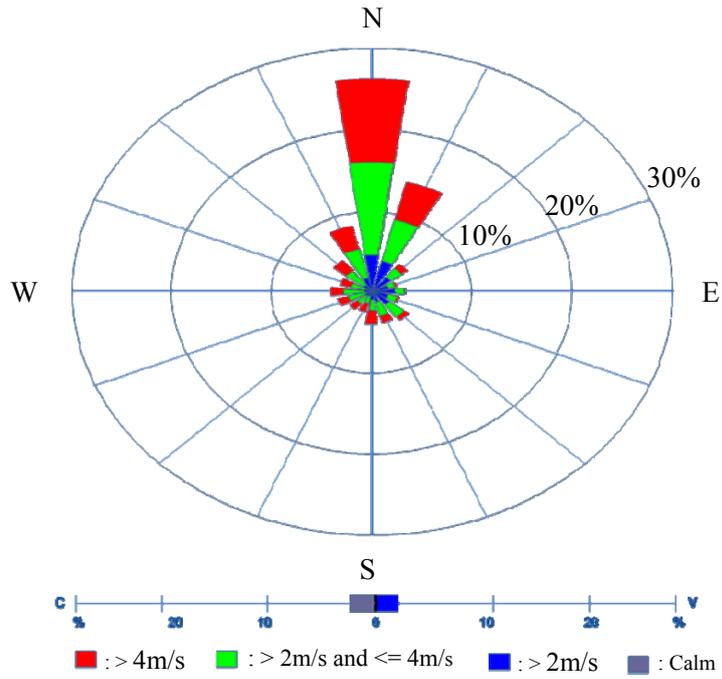


圖3-14 台南全年平均之風花圖

資料來源：本研究整理

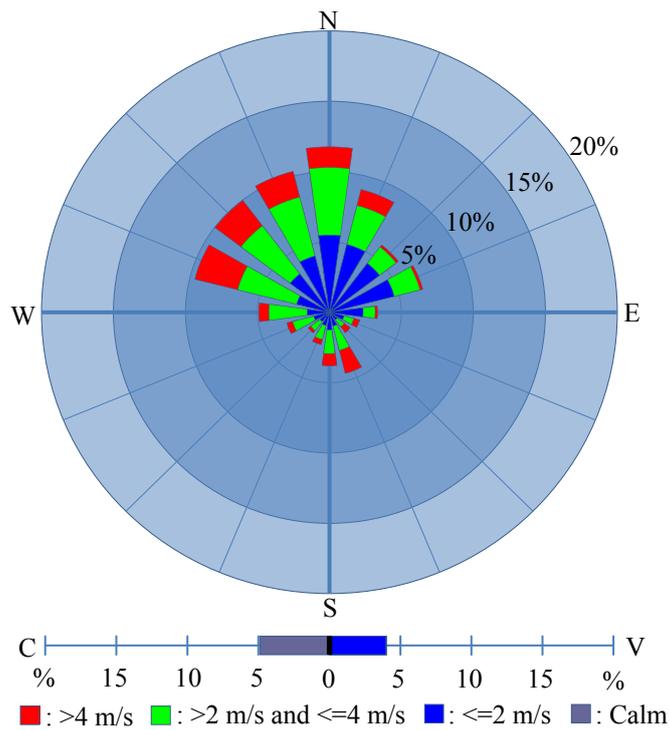


圖3-15 高雄全年平均之風花圖

資料來源：本研究整理

圖3-16、3-17、3-18、3-19為台北、台中、台南、高雄全年氣溫的發生機率圖，由圖中可知各地的氣溫最常發生在20 ~ 25 °C 之間。圖3-20、3-21、3-22、3-23為各地的相對濕度的機率發生圖，顯示台北、台中、台南的濕度最常發生範圍在70 ~ 80%，唯獨高雄的相對濕度最常發生範圍在60 ~ 70%（見圖3-23）。若為節省能源，建築物設定氣溫在26 °C 以下時，不使用冷氣，僅使用自然通風及風扇即可。台北、台中、台南、高雄四個都會區氣溫的發生機率列於表3-4。

本研究並採用林憲德(2009)所建議之通風利用率計算方式來計算台北、台中、台南、高雄四個都會區的自然通風利用率，其風壓通風的限制條件為：氣溫20~30 °C、風速0.1 ~ 3.0 m/s、濕度40 ~ 90%；浮力通風的限制條件：氣溫12~20 °C、風速0.0 ~ 3.0 m/s、濕度不設限。計算後的結果顯示於圖3-24中，透過數據可得知各地的風壓通風利用率皆高於浮力通風之利用率。而風壓通風利用率以高雄最高，浮力通風利用率以台中最高。台灣其餘各地的通風利用率列於表3-5所示，透過此表可知除了離島及山區之外，台灣大多數地區的通風利用率皆高於20%以上，適合利用自然通風來達到建築物通風的需求，降低能源消耗。

表 3-4 台灣都會區氣溫的發生機率

| 都市 | 超過 26 °C 的機率(%) | 超過 28 °C 的機率(%) |
|----|-----------------|-----------------|
| 台北 | 31.6 | 19.1 |
| 台中 | 33.8 | 20.2 |
| 台南 | 42.8 | 25.3 |
| 高雄 | 46.0 | 25.8 |

資料來源：本研究整理

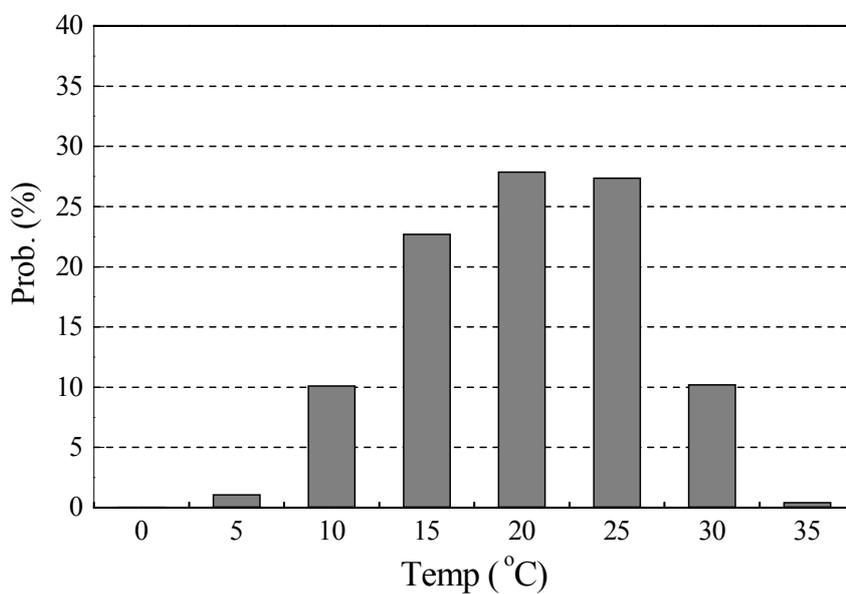


圖3-16 台北市氣溫的機率發生圖

資料來源：本研究整理

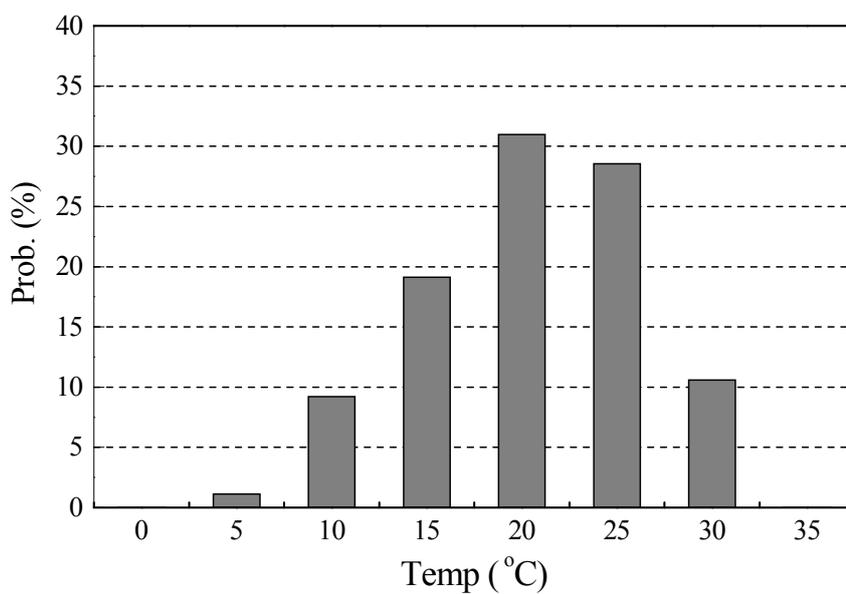


圖3-17 台中市氣溫的機率發生圖

資料來源：本研究整理

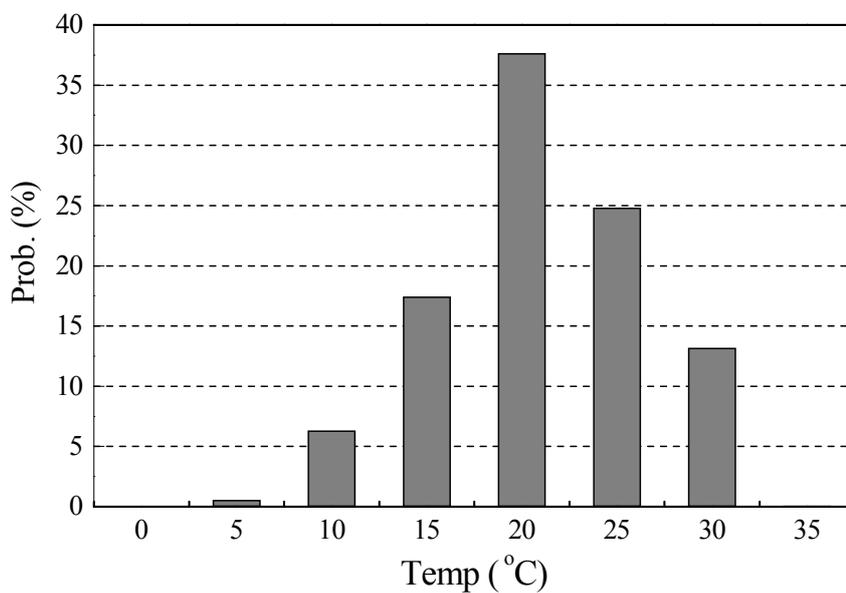


圖3-18 台南市氣溫的機率發生圖

資料來源：本研究整理

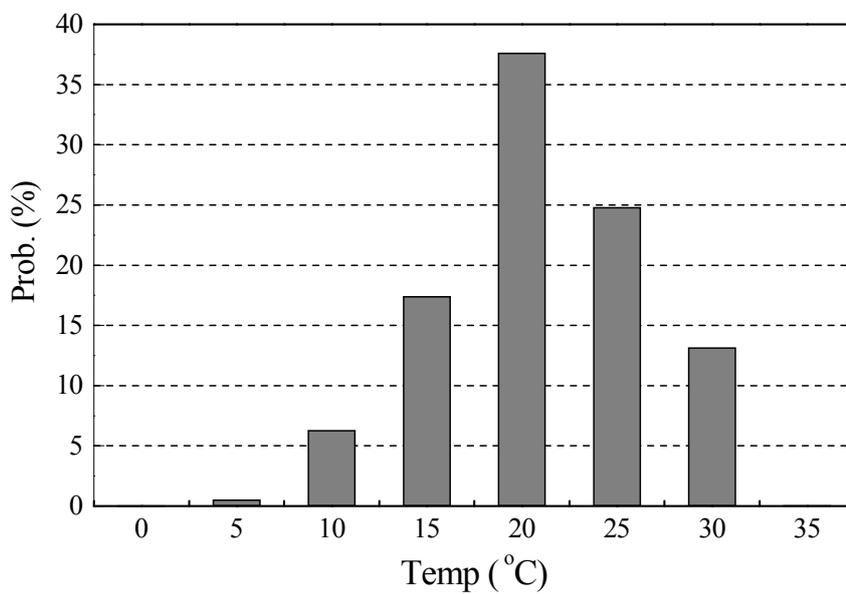


圖3-19 高雄市氣溫的機率發生圖

資料來源：本研究整理

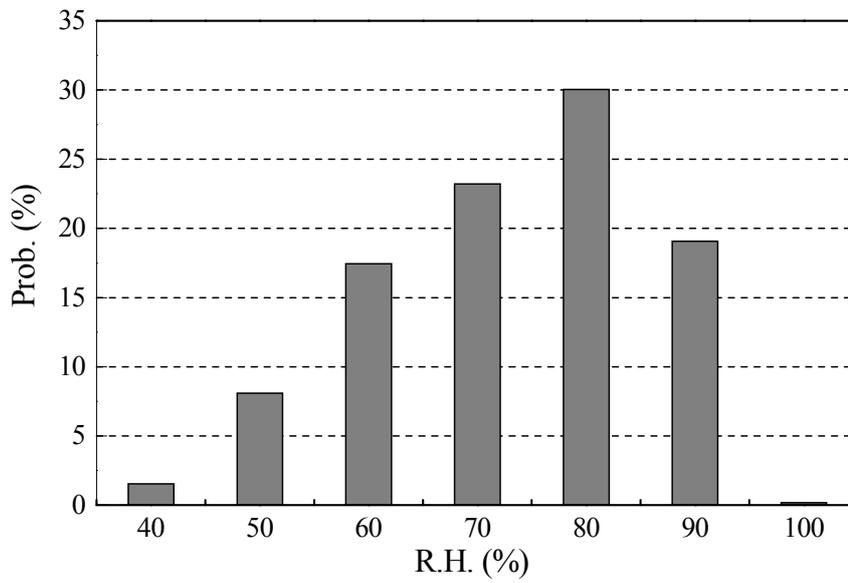


圖3-20 台北市相對濕度的機率發生圖

資料來源：本研究整理

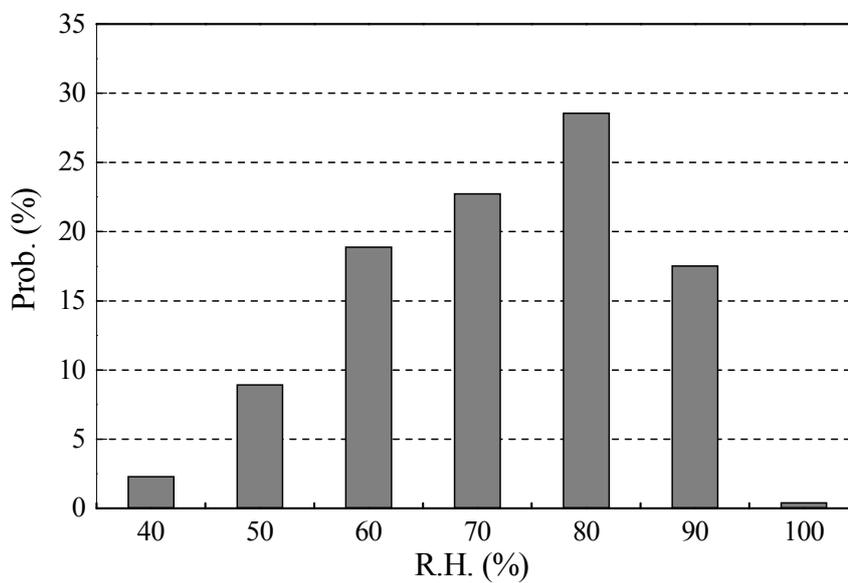


圖3-21 台中市相對濕度的機率發生圖

資料來源：本研究整理

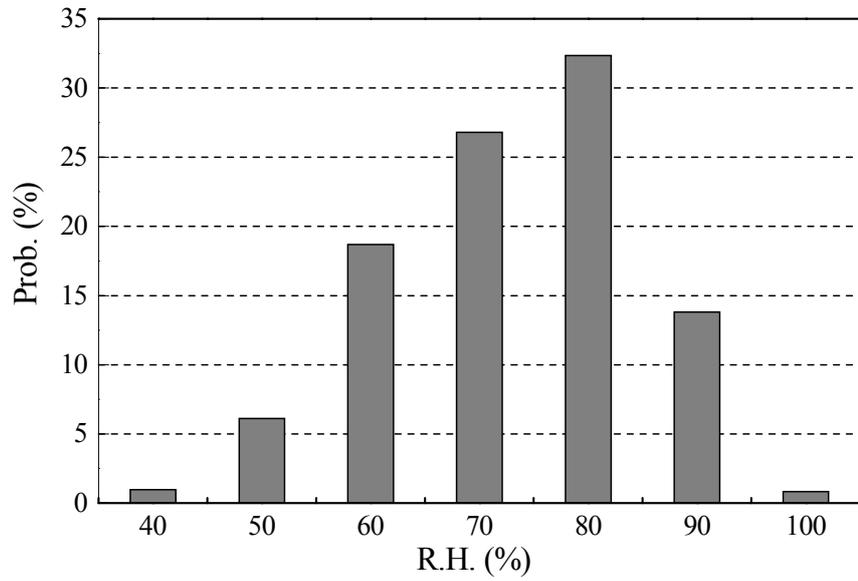


圖3-22 台南市相對濕度的機率發生圖

資料來源：本研究整理

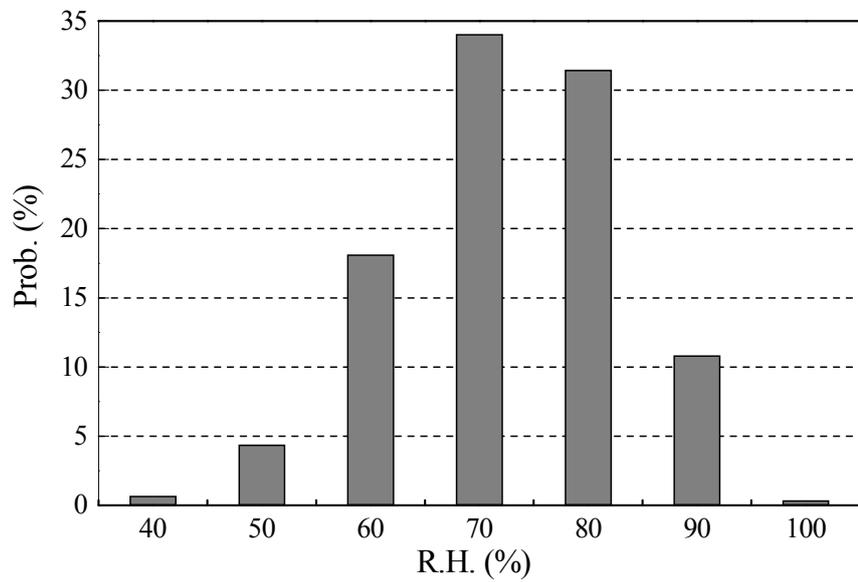


圖3-23 高雄市相對濕度的機率發生圖

資料來源：本研究整理

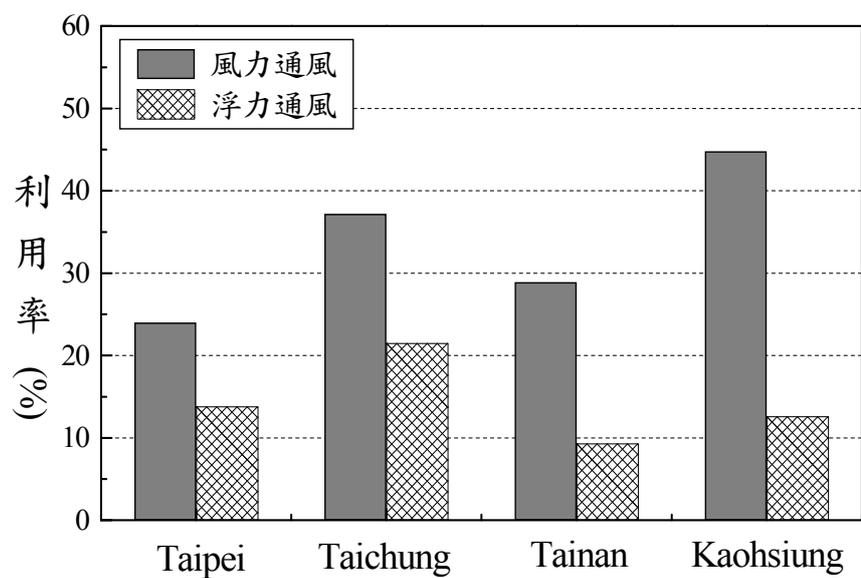


圖3-24 台北、台中、台南、高雄的通風利用率比較圖

資料來源：本研究整理

表 3-5 台灣地區的通風利用資料表

| 都市 | 風力通風利用率 (%) | 浮力通風利用率 (%) |
|--|----------------|----------------|
| 台北 | 24.0 | 13.8 |
| 台中 | 37.2 | 21.5 |
| 台南 | 28.9 | 9.3 |
| 高雄 | 44.8 | 12.6 |
| 新竹 | 28.5 | 17.3 |
| 鞍部 | 14.2 | 21.5 |
| 竹子湖 | 25.7 | 26.4 |
| 淡水 | 30.8 | 21.5 |
| 玉山 | 0.0 | 3.9 |
| 基隆 | 29.3 | 14.4 |
| 宜蘭 | 31.5 | 27.6 |
| 梧棲 | 20.7 | 5.2 |
| 日月潭 | 27.1 | 45.1 |
| 阿里山 | 0.4 | 43.7 |
| 花蓮 | 38.9 | 17.7 |
| 恆春 | 4.0 | 0.5 |
| 嘉義 | 30.6 | 19.8 |
| 成功 | 32.7 | 6.8 |
| 大武 | 42.9 | 7.1 |
| 蘇澳 | 35.8 | 18.3 |
| 台東 | 51.3 | 14.8 |
| 蘭嶼 | 4.0 | 0.5 |
| 彭佳嶼 | 3.7 | 1.2 |
| 澎湖 | 18.4 | 2.7 |
| 東吉島 | 9.3 | 0.3 |
| 註：風壓通風的限制條件氣溫 20~30°C、風速 0.1~3.0m/s、濕度 40~90%； 浮力通風的限制條件氣溫 12~20°C、風速 0~3.0m/s、濕度不設限。 | | |

資料來源：本研究整理

第四章 風洞實驗

第一節 實驗配置與量測方法

本研究利用內政部建築研究所風雨風洞實驗室的大型風洞進行建築物風壓通風實驗，該風洞是一個封閉迴路式風洞(如圖 4-1)，總長度為 77.9 m，高度為 15.9 m，最大寬度為 9.12 m。該風洞具有兩個測試區，第一測試區長 36.5 m，斷面為 4.0 m × 3.0 m；第二測試區長 21 m，斷面為 6.0 m × 2.6 m。本研究之模型實驗是在第一測試區中進行，最大風速可達 30 m/s，空風洞時風洞內紊流強度 0.17~2.0% (葉祥海、苗君易，2004)。

建築物模型以壓克力板製作，模型尺寸為長度 $D = 30$ cm，寬度 $B = 30$ cm，高度 $H = 60$ cm，模型縮尺比為 1:100。建築物模型前方設置一不透風式擋風牆，其尺寸為寬度 $B_b = 40$ cm，高度 $H_b = 40$ cm，厚度 $t_b = 1$ cm，如圖 4-2、4-3 所示。模型的正面有 55 個壓力量測孔。壓力量測孔上下、左右的間距皆為 5 cm，壓力量測孔直徑 0.1 cm。壓力量測孔連接內徑 0.1 cm 之 PVC 管至壓力感應器，管線長度 10 ~ 55 cm。風洞實驗時，建築物模型放置於測試區的第一旋轉盤上與第二旋轉盤上(如圖 4-4)，模型距離測試段入口處分別為 2.6 m 與 25.1 m，量測在不同邊界層厚度之來流狀況下建築物表面風壓。

除此之外，本研究亦利用中央大學的風洞進行熱浮力通風實驗，所使用的風洞是一個開放式風洞，全長 8.3 m，試驗段長 1.5 m，寬 1.2 m，高 0.5 m，最高風速可達 50 m/s。風洞地板裝設一塊加熱板，可藉由控制加熱板溫度改變模型內溫度(如圖 4-5)。建築模型放置於試驗段的中心軸線上，距離風洞出口 1.2 m 處，模型內溫度場以熱偶溫度計監測，通風量以示蹤劑濃度衰減法量測而得。此實驗可研究風壓與熱浮力同時作用之下，建築物自然通風之現象。

一、壓力量測

模型表面風壓係以建築研究所風洞實驗室的多頻道電子式壓力掃瞄器(ZOC33/64 PX, Scanivalve)配合壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200)同步量測建築物表面各點的瞬時壓力(如圖 4-6、圖 4-7)。該壓力掃瞄器每個模組有 64 個壓力輸入管(pneumatic inputs), 對應 64 個壓電式壓力感應器, 64 個壓力感應器共用一個參考壓力(Reference), 但每個壓力感應器皆可單獨校正。氣流輸入管是由內徑 0.1 cm PVC 管連接至模型量測點以量測模型表面壓力。壓力量測系統可支援類比數位之轉換, 本研究所使用量測系統最高可支援 8 個模組, 其解析度達 16 bits, 最大取樣頻率為 500 Hz, 擷取之資料轉換完成後可藉由 USB 傳輸系統傳至個人電腦儲存分析。本研究進行風洞實驗時, 將壓力模組放入建築物模型內部, 壓力管線連接至壓力模組上的壓力輸入埠, 模型每一個表面分別規劃為同一壓力模組, 一次使用 1 個壓力模組, 再接入電子式壓力掃瞄器。而風洞內參考風速則是利用皮托管(如圖 4-8)量測。

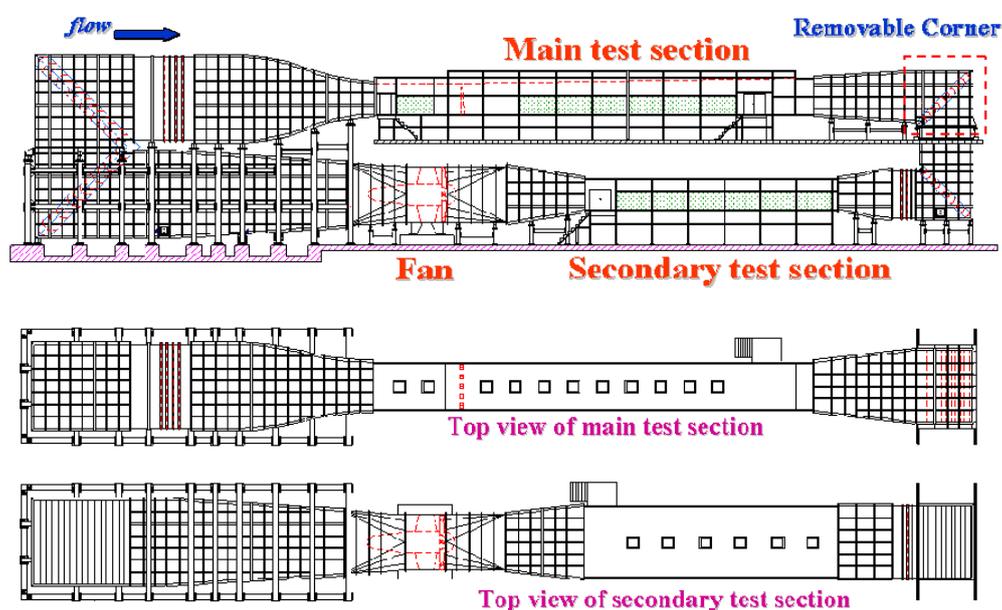


圖 4-1 建築研究所風洞實驗室配置圖

資料來源：建研所提供



圖 4-2 建築物模型置於第一轉盤之照片圖

資料來源：本研究整理



圖 4-3 建築物模型置於第一轉盤之照片圖

資料來源：本研究整理

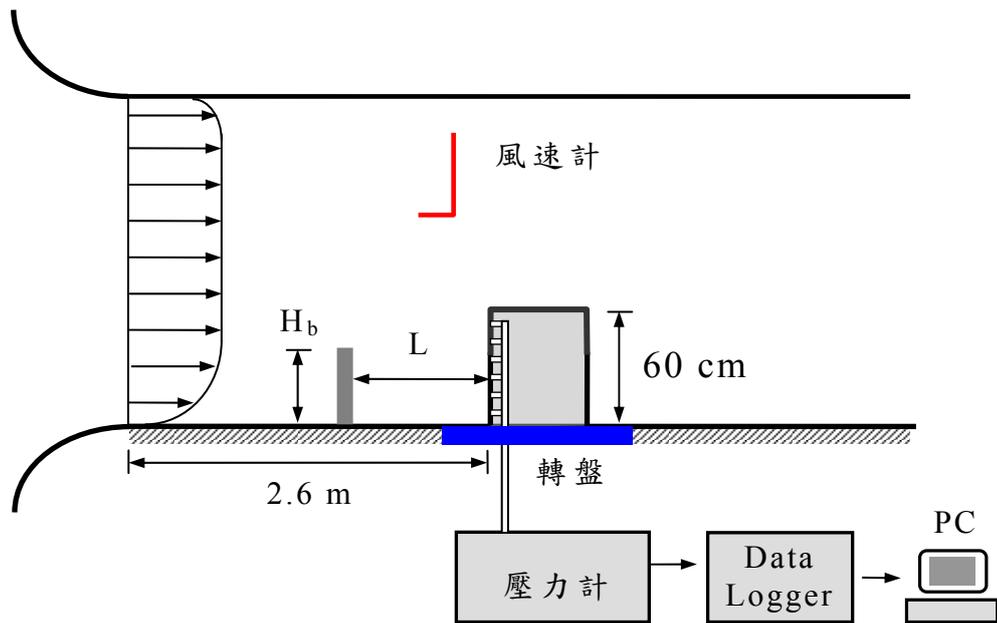


圖 4-4 風壓實驗配置之示意圖

資料來源：本研究整理

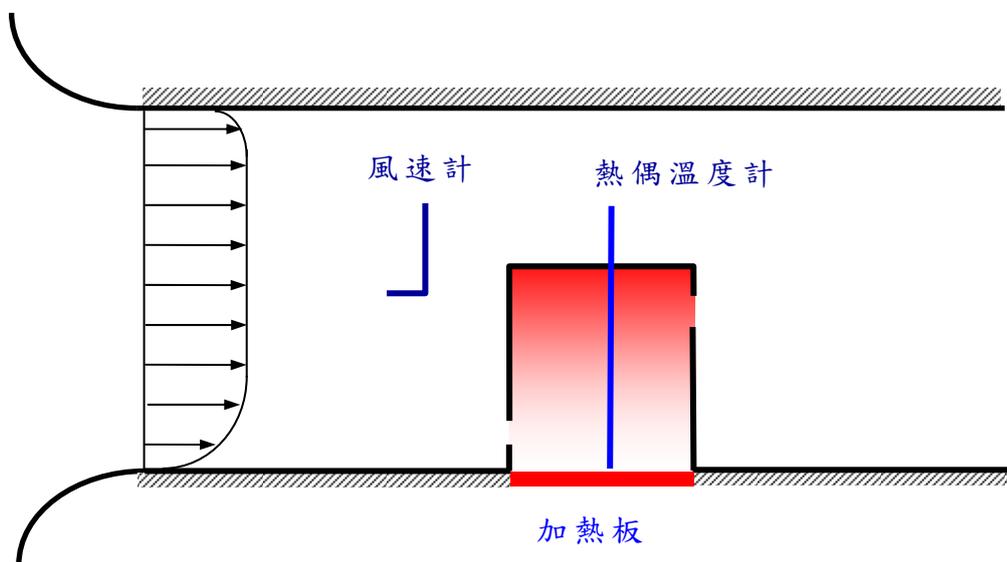


圖 4-5 熱浮力通風實驗之示意圖

資料來源：本研究整理

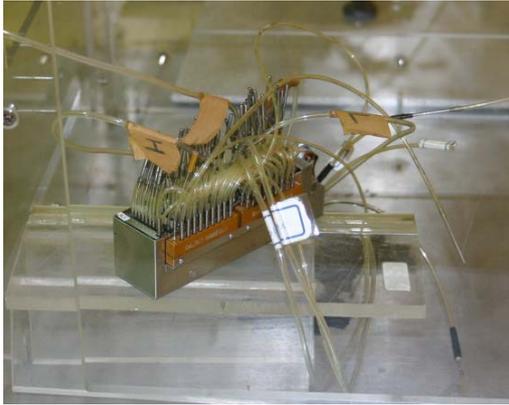


圖 4-6 壓力掃瞄器
資料來源：本研究整理

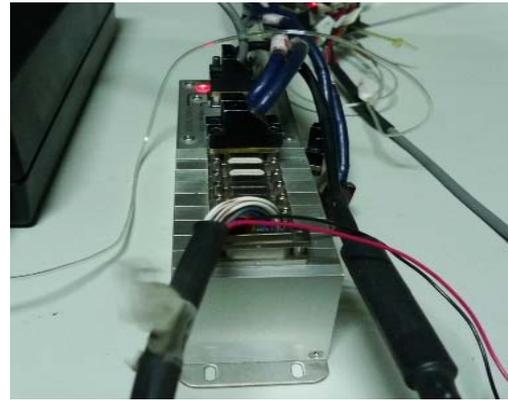


圖 4-7 壓力訊號處理系統
資料來源：建研所提供



圖 4-8 皮托管
資料來源：建研所提供



圖 4-9 氣相層析儀
資料來源：本研究整理

進行模型表面風壓量測時，先將模型固定於旋轉盤上，隨後啟動風機，待試驗區風速穩定後開始擷取壓力資料。試驗風速 12 m/s，取樣頻率為 100 Hz，取樣時間為 245.76 秒，每個量測點共有 24576 筆數據。每量測完一組便將轉盤順時針旋轉 90°，量測模型側面及背面的表面壓力分佈。實驗中參考壓力 P_0 和風速 U_0 分別為距離風洞地板底部 60 cm 處之皮托管靜壓和風速。

二、濃度量測

本研究利用示蹤劑濃度衰減法(Tracer gas decay method)量測熱浮力的通風量，此法是在建築物模型密閉的狀況下，在模型內注入定量的示蹤劑氣體 CH_4 ，測試模型內濃度是否會隨時間而變(模型接縫處是否有漏氣)。實驗開始時打開建築模型之開口，利用模型內的四個採樣管

及抽氣幫浦連接到氣相層析儀(Gas Chromatography)，量測模型內平均濃度隨時間的變化，約 1 分鐘採樣一次。再由濃度隨時間的變化曲線計算通風量 Q ：

$$Q = V \frac{\ln(C(t_1)/C(t_2))}{t_2 - t_1} \quad (4-1)$$

式中 V 為室內體積， $C(t_1)$ 和 $C(t_2)$ 為兩個不同時間的濃度。當通風量為定值（不隨時間而變），通風量 Q 可以下式計算：

$$Q = V \cdot \frac{C(t_1) - C(t_2)}{\int_{t_1}^{t_2} C(t) dt} \quad (4-2)$$

若室內無示蹤劑的源(Source)或匯(Sink)，示蹤劑的濃度會成指數衰減：

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (4-3)$$

式中 C_0 為初始濃度， τ 為室內空氣更新所需的時間尺度：

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

將量測得之濃度值取自然對數後，對時間繪圖（半對數圖），濃度應成一條直線，由直線的斜率便可求得通風量 Q 。示蹤劑濃度量測細節可參見陳仁浩（2010）或 Chu et al.（2011）。

三、資料分析

風洞實驗中，參考壓力 P_0 為自由流之壓力。當氣流碰到建築物迎風面而停滯時，風速的動能轉換為動壓力，故表面壓力會大於自由流之壓力，而形成正壓。在建築物背風面及側風面處，因分離現象造成的加速效應及尾流的渦漩作用，會低於自由流之壓力，形成負壓區。時間平均壓力：

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(t_i) \quad (4-5)$$

式中 N 為量測數據的總數，壓力常以無因次的壓力係數(Pressure coefficient)表示，時間平均壓力係數：

$$C_p = \frac{\bar{P} - P_0}{0.5\rho U_0^2} \quad (4-6)$$

式中 ρ 為空氣密度， P_0 為參考壓力， U_0 為自由流的時間平均風速。

第二節 風壓實驗結果

本實驗將模型分別放置於第一及第二旋轉盤處，其目的在比較不同流場狀況下建築物表面的壓力分佈。當模型放置於第一旋轉盤處時，第一旋轉盤處前方不設置任何物體或粗糙元，其邊界層厚度為 7.5 cm，紊流強度 $I_u = 1\%$ ，稱為平滑流(smooth flow)。紊流強度的定義為：

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)} \quad (4-7)$$

式中 σ_u 為 x 方向紊流流速的均方根值(standard deviation)。

當建築物模型放置於第二旋轉盤時，轉盤前方佈設粗糙元(roughness element)，使得邊界層加速發展。其平均風速剖面圖與紊流強度剖面圖顯示於圖 4-10(a)、4-10(b)，自由流風速 $U_0 = 12$ m/s，將平均風速代入指數律(power law)可求得指數 $\alpha = 0.16$ ， $\delta = 160$ cm，此紊流邊界層應屬於地況 C，建築物高度處的紊流強度 $I_u = 10\%$ ，為紊流邊界層(Turbulent boundary layer flow)。

本風洞實驗的目的為量測擋風牆放置在建築物前不同位置時建築物表面的時間平均壓力係數。實驗的風向角為風向角與建築物表面夾角。角度 $\theta = 0^\circ$ ，為建築物迎風面。角度 $\theta = 90^\circ$ ，為建築物側面。角度 $\theta = 180^\circ$ ，為建築物背風面。因模型為左右對稱，實驗僅量測一個側面的表面壓力。

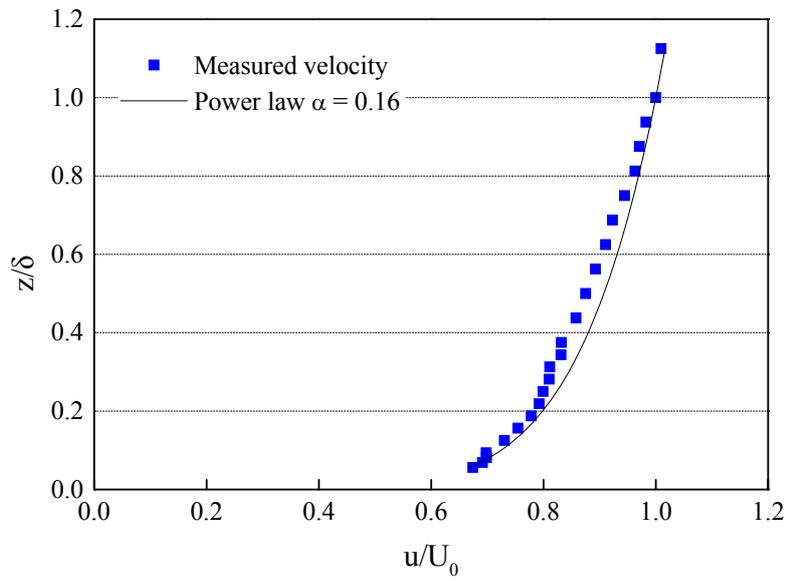


圖 4-10(a) 紊流邊界層平均風速剖面圖

資料來源：建研所提供

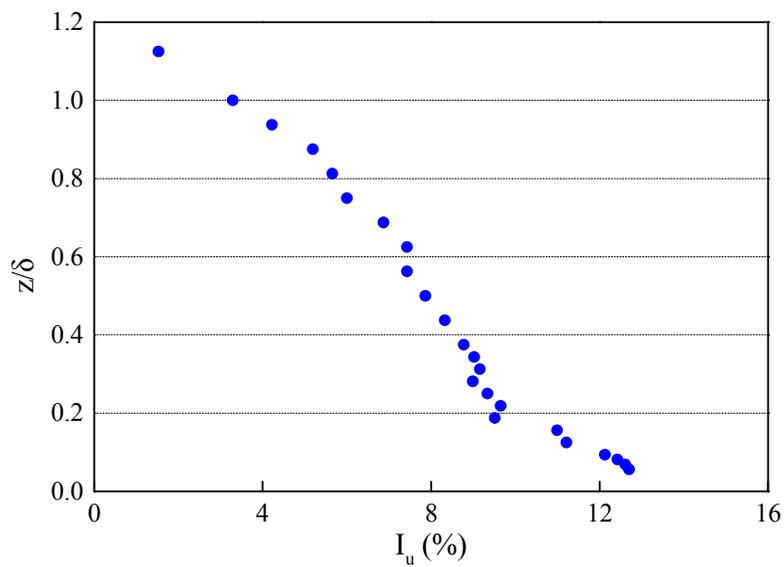


圖 4-10(b) 紊流邊界層紊流強度剖面圖

資料來源：建研所提供

本研究分別在平滑流與紊流邊界層流中，改變擋風牆與建築物模型之間的距離 L ，探討擋風牆對建築物表面風壓及風壓通風的影響。圖 4-11(a)為來流為平滑流狀況，不同的距離 $L = 0.3\text{ m}$, 0.4 m , 0.6 m , 0.9 m , 1.2 m 狀況下，建築物迎風面中心線($y/W = 0.5$)的時間平均風壓係數 C_D 分佈圖。圖 4-11(a)顯示建築物迎風面上半部($z/H > 0.85$)的風壓係數 C_D 為正值，迎風面下半部的 C_D 為負值。這是因為擋風牆高度($H_b = 40\text{ cm}$)低於建築物高度($H_b = 60\text{ cm}$)，被擋風牆遮蔽部分的下半部表面壓力小於自由流壓力，故風壓係數為負。且在距離 $L/H = 1.0$ 遮蔽效應最顯著(C_D 值最小)，而隨著距離 L 增加，遮蔽效應減小，故風壓係數變大。當距離 $L/H = 0.5$ 建築物接近頂部的正風壓係數大於其他處的 C_D ，這是通過擋風牆上緣的加速氣流撞擊到建築物頂部所造成。

圖 4-11(b)為平滑流狀況中，擋風牆在不同的上風距離 L ，建築物側面位置($z/H = 0.5$)之風壓係數 C_D 分佈，此圖顯示：側面的風壓係數大多為負值，介於 $-0.40 \sim 0.05$ 之間。且隨著距離 L 越大，建築物側面的 C_D 值也隨之增加。圖 4-11(c)為建築物背風面中心線($y/W = 0.5$)的時間平均風壓係數，由此圖可看出 C_D 值亦為負值，介於 $-0.30 \sim 0.0$ 之間。且隨著擋風牆的距離 L 增加而略微增加，當擋風牆距離建築物 $L \geq 0.6\text{ m}$ 時，距離 L 對背風面的風壓影響不大。

圖 4-12(a)、4-12(b)、4-12(c)為來流流況為紊流邊界層流時，建築物迎風面、側面及背風面風壓係數 C_D 之分佈，其分佈趨勢與平滑流的風壓分佈類似，但 C_D 值略小於平滑流的風壓係數。這是因為紊流邊界層流中紊流較強，混合較佳，故壓力更接近自由流之壓力(C_D 值更接近 0)。

圖 4-13、4-14、4-15 比較不同來流流況時，擋風牆距離建築物模型 $L = 0.3\text{ m}$ 、 0.6 m 、 1.2 m ，模型表面之風壓係數。由此結果可以看出：在平滑流與紊流邊界層流中，在兩倍建築物高度($L/H_b = 2$)下風距離處，擋風牆之效應仍然存在，會影響下風建築物的風壓通風速率。

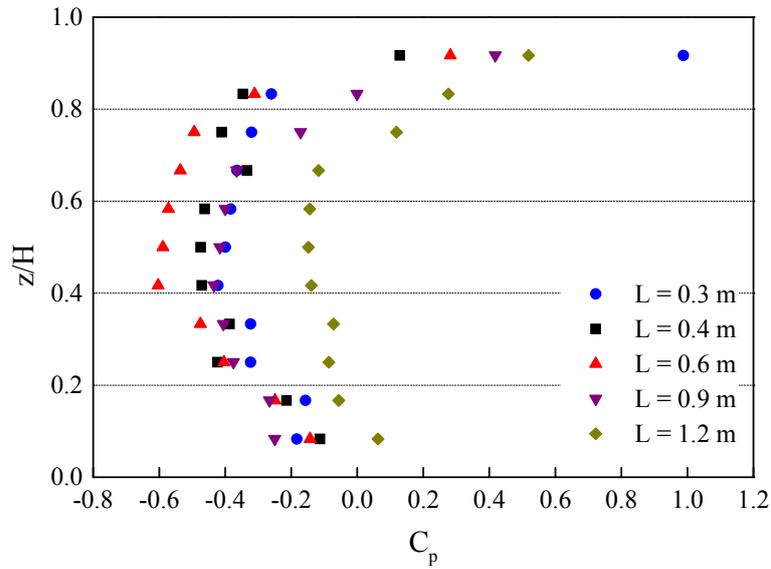


圖 4-11(a) 平滑流中建築物迎風面中心線上平均風壓剖面圖
資料來源：本研究整理

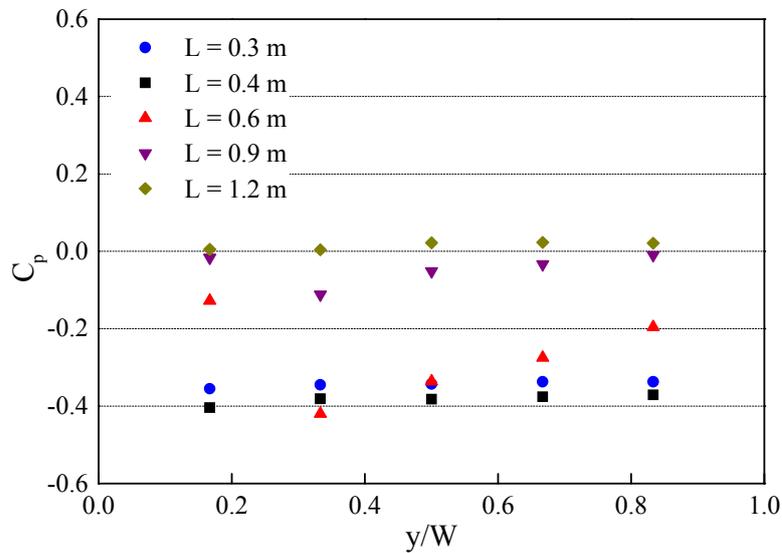


圖 4-11(b) 平滑流中建築物側面中心線上平均風壓剖面圖
資料來源：本研究整理

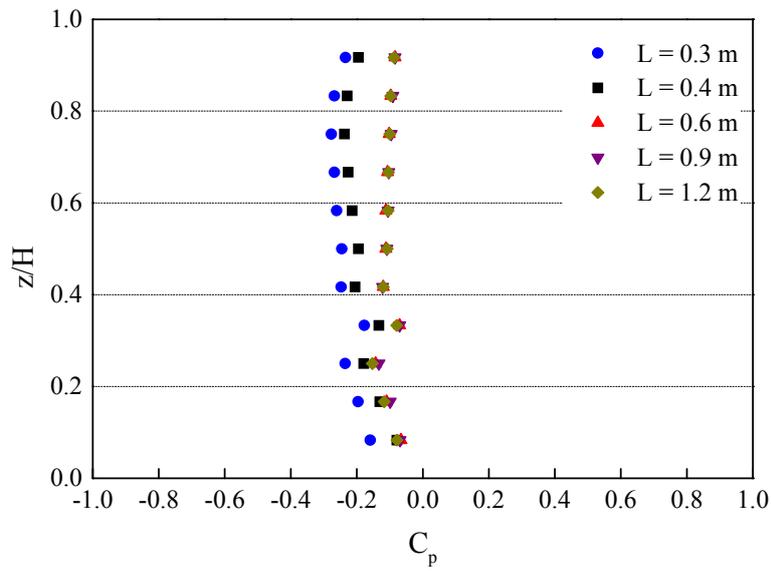


圖 4-11(c) 平滑流中建築物背風面中心線上平均風壓剖面圖
資料來源：本研究整理

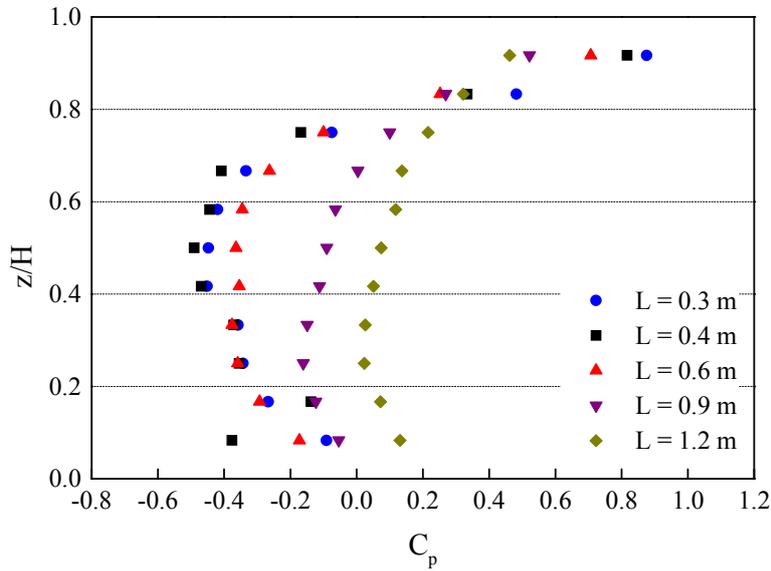


圖 4-12(a) 邊界層流中建築物迎風面中心線平均風壓剖面圖
資料來源：本研究整理

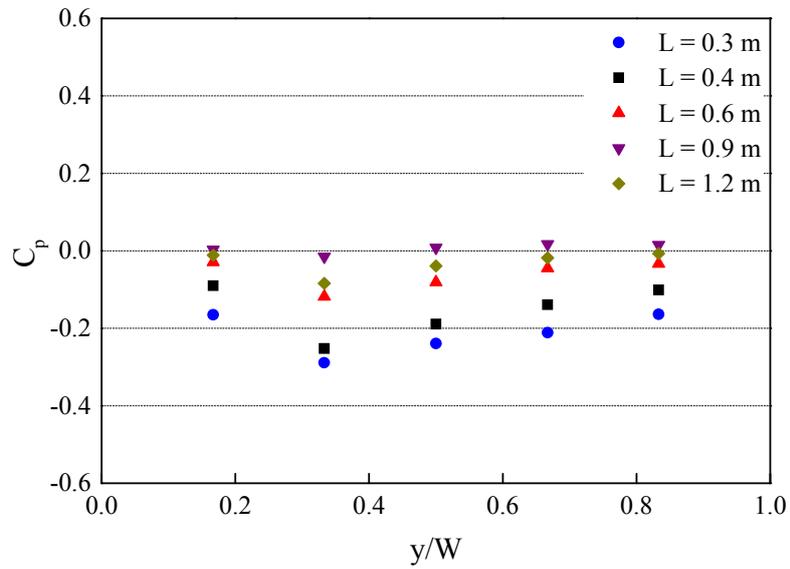


圖 4-12(b) 邊界層流建築物側面中心線平均風壓剖面圖
資料來源：本研究整理

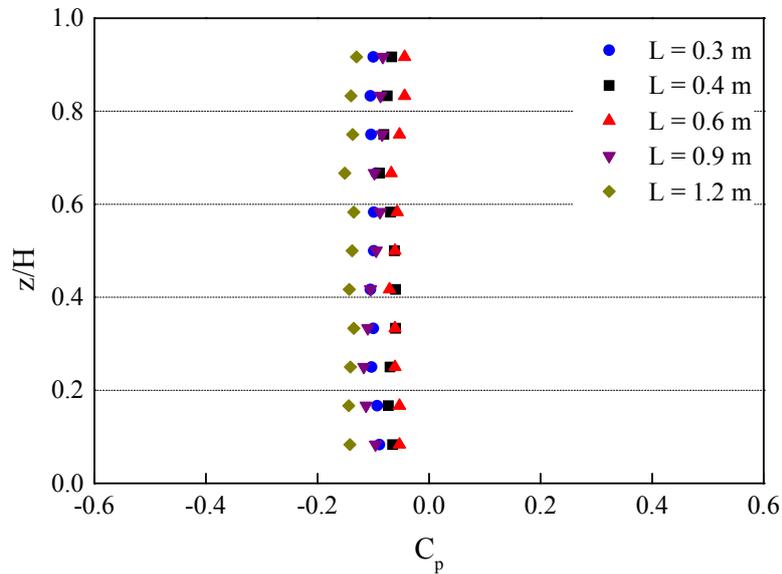


圖 4-12(c) 邊界層流建築物背風面中心線平均風壓剖面圖
資料來源：本研究整理

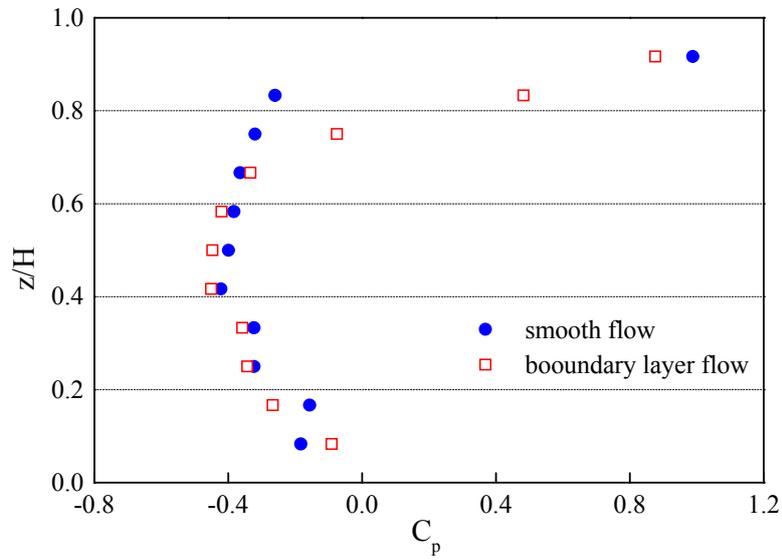


圖 4-13(a) 比較平滑流與邊界層流中 $L = 0.3 \text{ m}$ 建築物迎風面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

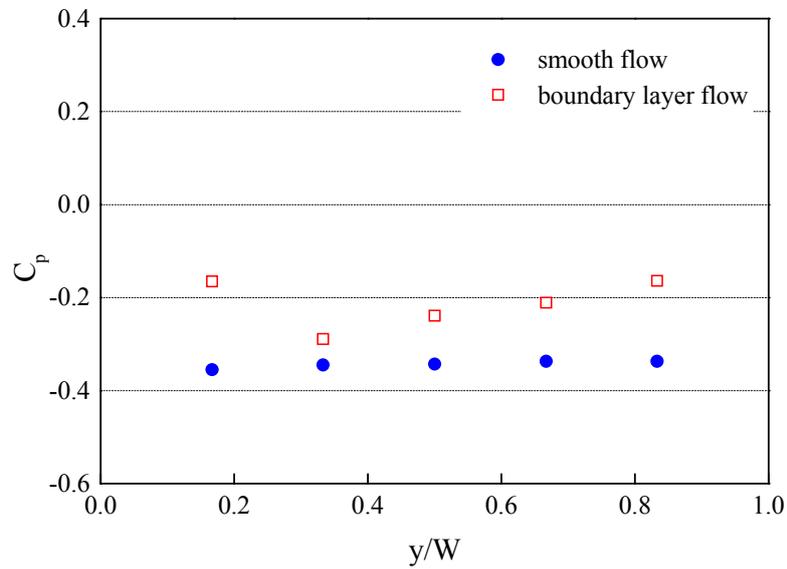


圖 4-13(b) 比較平滑流與邊界層流中 $L = 0.3 \text{ m}$ 建築物側面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

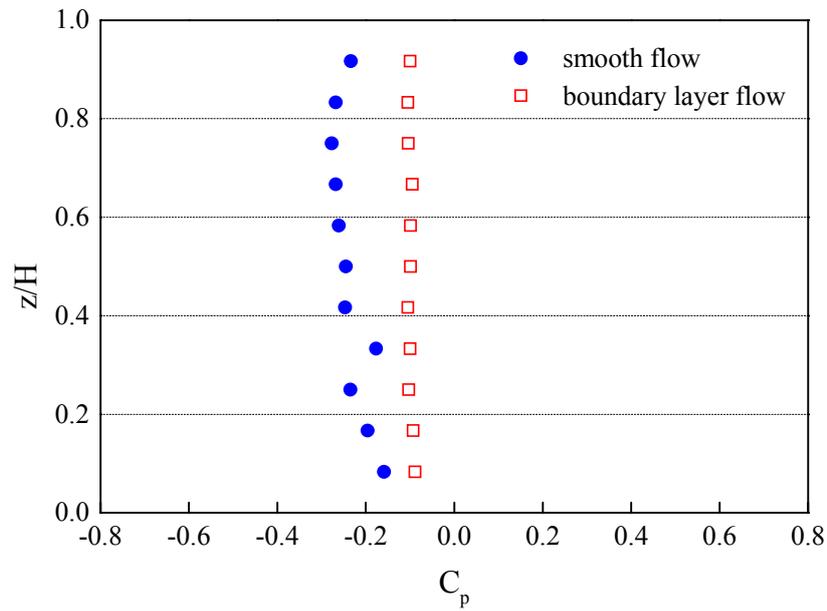


圖 4-13(c) 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.3\text{ m}$ 建築物背風面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

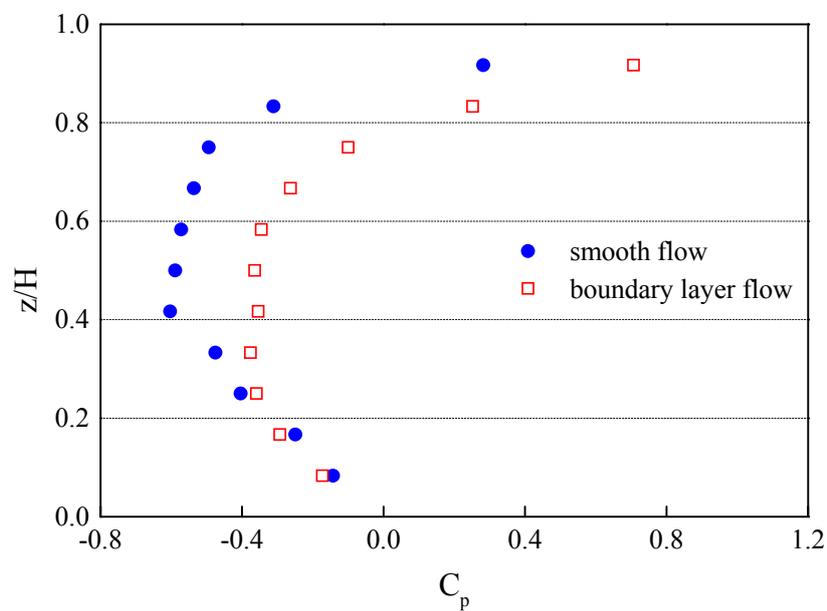


圖 4-14(a) 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.6\text{ m}$ 建築物迎風面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

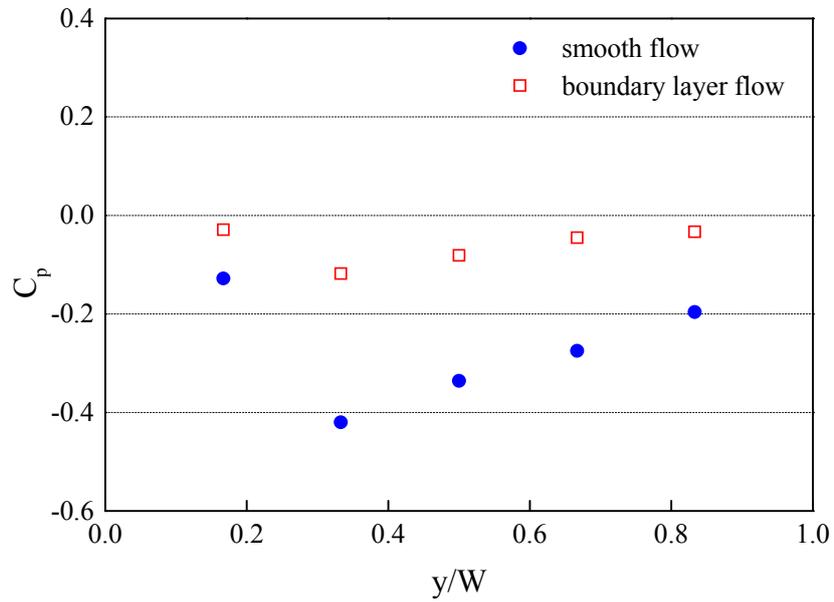


圖 4-14(b) 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.6\text{ m}$ 建築物側面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

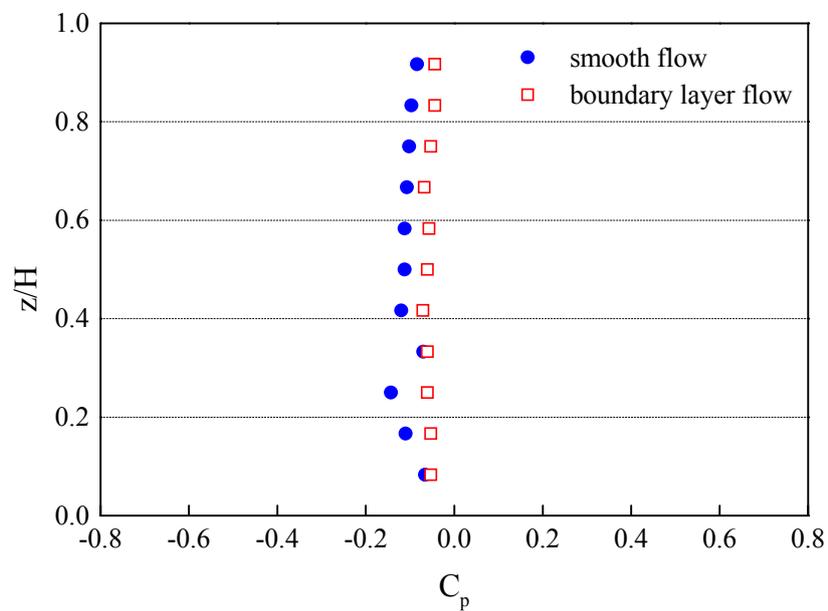


圖 4-14(c) 比較平滑流與邊界層流中 $L=0.6\text{ m}$ 建築物背風面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

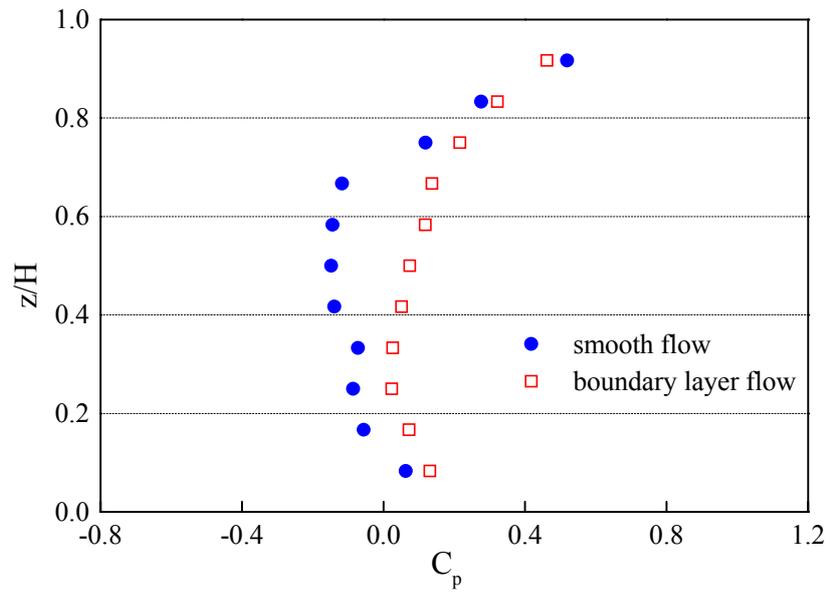


圖 4-15(a) 比較平滑流與邊界層流中 $L=1.2\text{ m}$ 建築物迎風面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

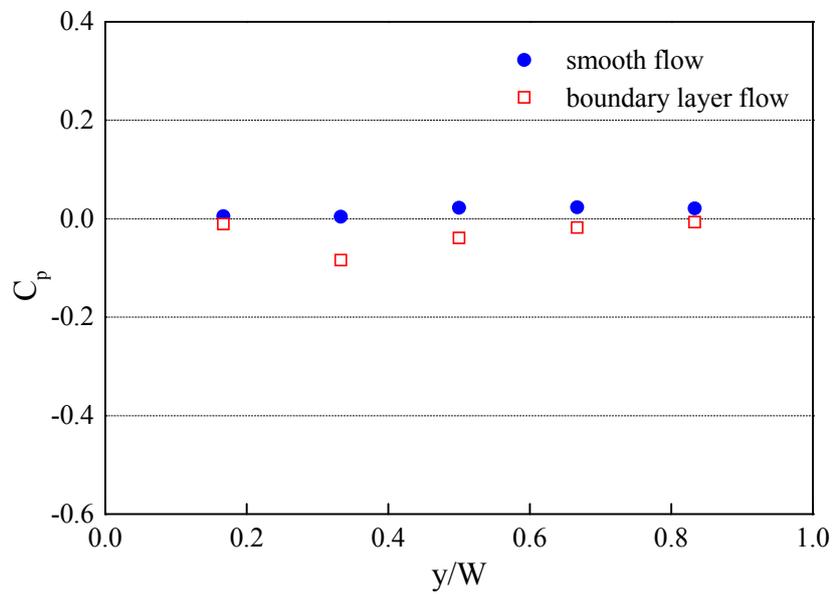


圖 4-15(b) 比較平滑流與邊界層流中 $L=1.2\text{ m}$ 建築物側面之風壓分佈
資料來源：本研究整理

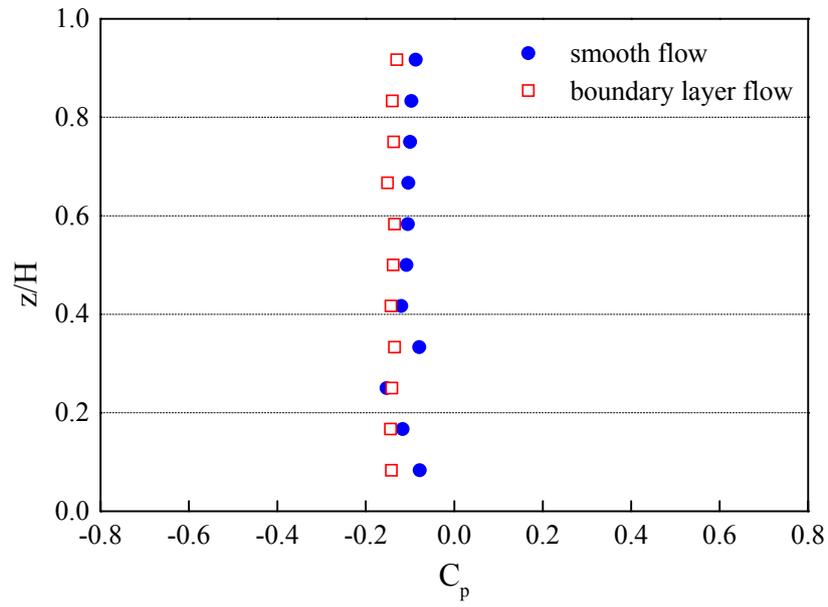


圖 4-15(c) 比較平滑流與邊界層流中 $L = 1.2\text{ m}$ 建築物背風面之風壓分佈
 資料來源：本研究整理

第三節 熱浮力通風實驗結果

本實驗將模型放置於加熱板上，其目的在比較不同狀況下熱浮力驅動之通風量。模型外部的尺寸：寬 30 cm，長 30 cm，高 60 cm，扣除模型外殼厚度與內部支撐結構之體積，其內部體積 $V = 0.0476 \text{ m}^3$ 。模型上有兩個開口，開口面積 $A_1 = A_2 = 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ，一個開口中心在離地面距離 7.5 cm，另一個開口中心在離地面距離 52.5 cm。開啟加熱板的熱源裝置一段時間之後可將地面溫度加溫到恆定溫度 50°C ，在模型內架設 5 支熱偶溫度計，高度分別為 $z = 10 \text{ cm}$ 、 20 cm 、 30 cm 、 40 cm 、 50 cm 。在模型外距離試驗段地板 60 cm（與模型屋頂同高）放置 1 支熱偶溫度計以便觀察模型內外溫度變化。

本研究分為 3 個實驗，分別在不同狀況（模型的開口方式、室外風速）下，探討熱浮力對建築通風量的影響。圖 4-16 為實驗流況之示意圖，其流況分別為：

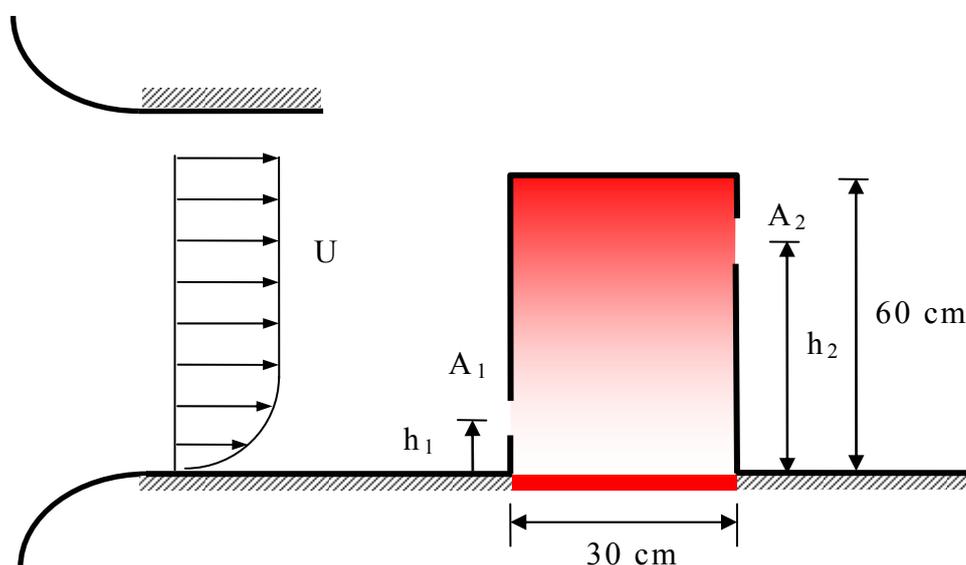


圖 4-16 實驗流況之示意圖

資料來源：本研究整理

Case 1：室外風速 $U = 0$ m/s，模型迎風面開口在下 ($h_1 = 7.5$ cm)，背風面開口在上 ($h_2 = 52.5$ cm)；

Case 2：室外風速 $U = 2$ m/s，迎風面開口在下 ($h_1 = 7.5$ cm)，背風面開口在上 ($h_2 = 52.5$ cm)；

Case 3：室外風速 $U = 2$ m/s，迎風面開口在上 ($h_1 = 52.5$ cm)，背風面開口在下 ($h_2 = 7.5$ cm)。

圖 4-17(a)、(b)、(c)顯示關閉加熱板的熱源後，Case 1、2、3 模型內部溫度隨時間之變化圖。可看出因為自然通風之效果，在室外有風 (Case 2、3) 的情況下溫度下降的速率比室外無風 (Case 1) 下降地快，當室外風速皆為 $U = 2$ m/s 時，Case 2 降溫速率與 Case 3 降溫速率相近。當室內溫度逐漸變小時，憑藉室內外溫差驅動之熱浮力通風量亦會變小，此狀況之熱浮力通風為非穩態 (unsteady) 之過程。圖 4-18(a)、(b)、(c)顯示加熱板的熱源保持恆定的狀態下，模型內部溫度隨時間之變化圖。可看出室內溫度幾乎不變，此時之熱浮力通風為穩態 (steady) 現象。由不同高度之溫度相差並不大看來，應該是模型內的紊流使得內部空氣在完全混合狀態。

在加熱板的熱源保持恆定的狀態下，利用示蹤劑濃度衰減法量測模型內濃度之變化。圖 4-19 比較 Case 1、Case 2、Case 3 狀況下量測得之模型內示蹤劑濃度變化，將量測得之濃度取自然對數後，對時間繪圖，濃度應成一條直線，由直線的斜率與模型內部體積便可求得通風量 Q ，結果列於表 4-1。 T_a 為模型外時間平均氣溫， T_r 為模型內時間平均氣溫。

表 4-1 實驗流況之重要參數

| | U (m/s) | T_a ($^{\circ}C$) | T_r ($^{\circ}C$) | Q (m^3/s) |
|--------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Case 1 | 0.0 | 26.04 | 39.28 | 0.38×10^{-4} |
| Case 2 | 2.0 | 27.48 | 38.74 | 1.77×10^{-4} |
| Case 3 | 2.0 | 24.83 | 34.87 | 1.11×10^{-4} |

資料來源：本研究整理

由表 4-1 可以看出：室外無風(Case 1)時，僅靠浮力通風之通風量 Q_1 最小。在室外有風的情況下，迎風面、背風面開口的高度也會影響模型內部濃度衰減的速度。Case 2 為模型迎風面開口位於低處，背風面在高處時，可以驅使冷空氣由迎風面開口流入模型內，熱空氣由背風面高處開口流出，風壓與熱浮力具有加成的效果，加速模型內降溫的速率。Case 3 的開口則與 Case 2 顛倒，風力與熱浮力互相抵銷，模型內降溫的效果較差。故通風量 Q_3 比 Q_2 小。

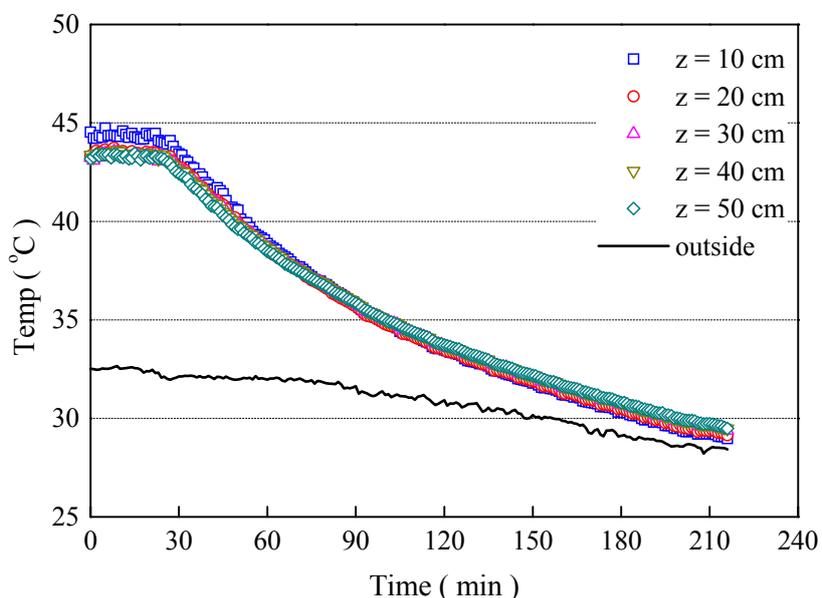


圖 4-17(a) Case 1 模型內外溫度隨時間變化圖

資料來源：本研究整理

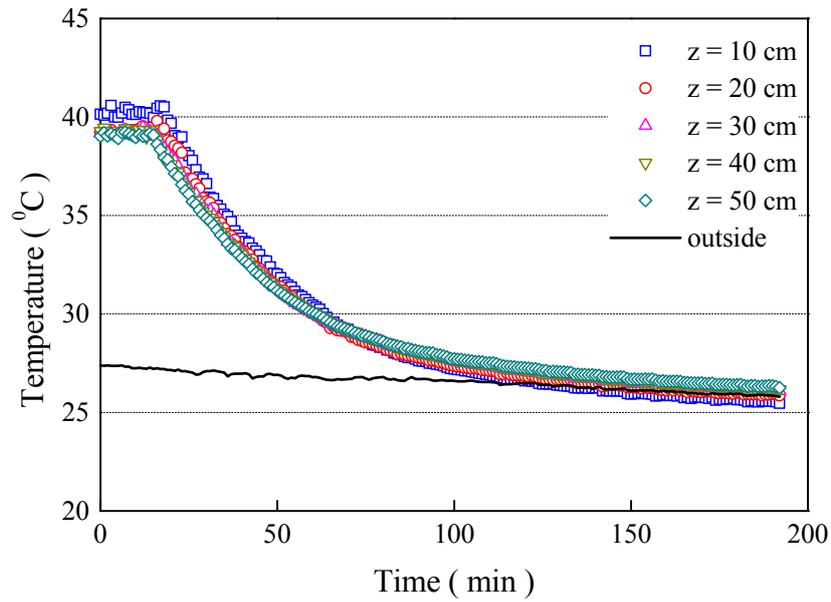


圖 4-17(b) Case 2 模型內外溫度隨時間變化圖

資料來源：本研究整理

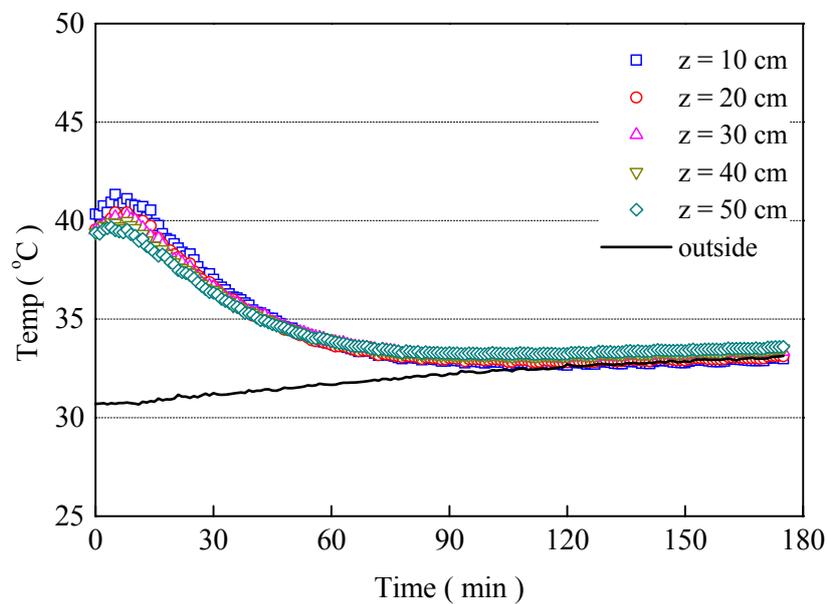


圖 4-17(c) Case 3 模型內外溫度隨時間變化圖

資料來源：本研究整理

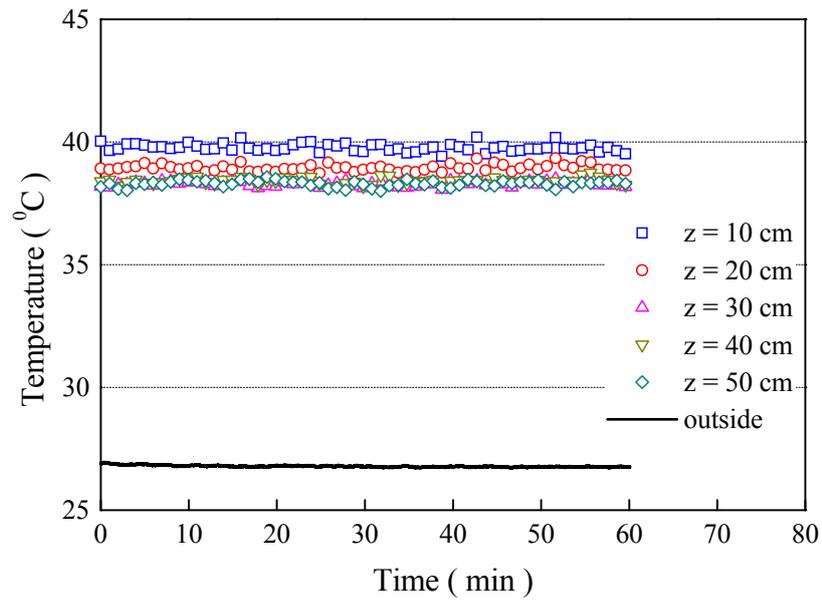


圖 4-18(a) Case 1 模型內外溫度隨時間變化圖

資料來源：本研究整理

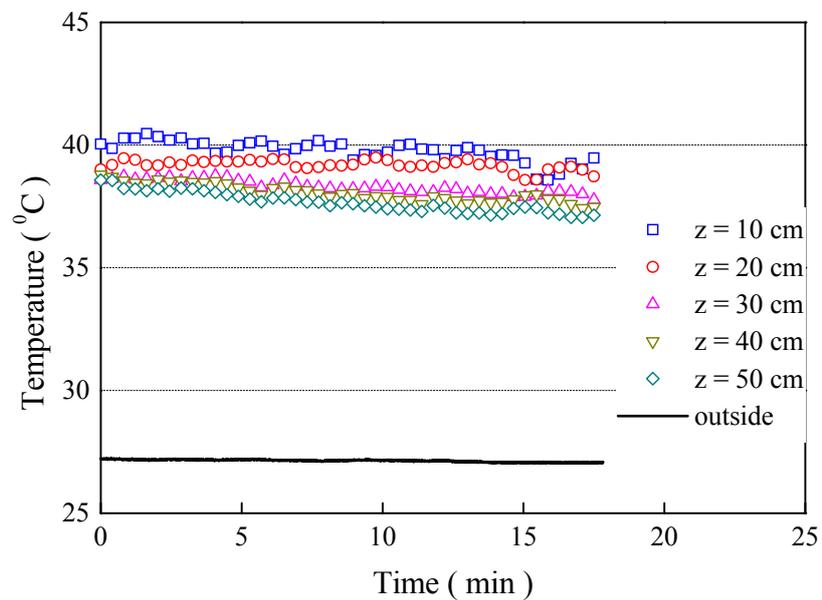


圖 4-18(b) Case 2 模型內外溫度隨時間變化圖

資料來源：本研究整理

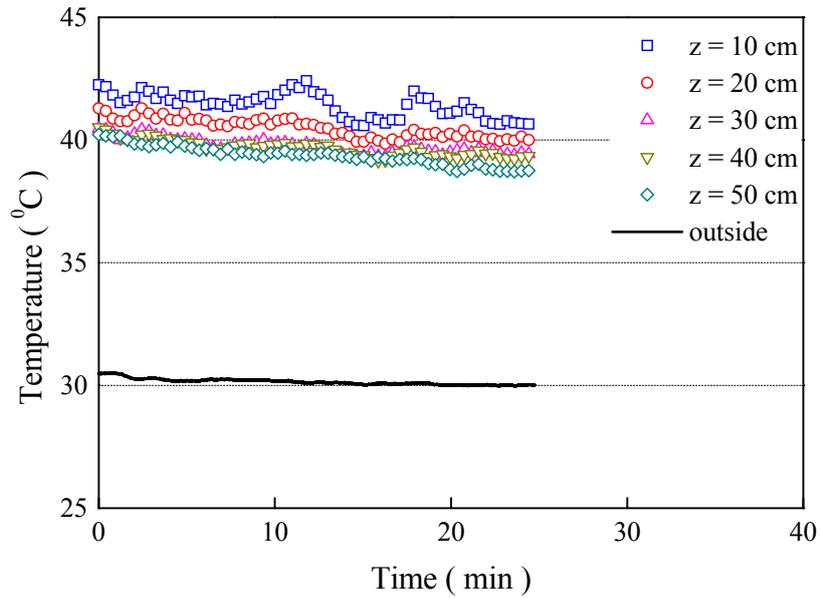


圖 4-18(c) Case 3 模型內外溫度隨時間變化圖

資料來源：本研究整理

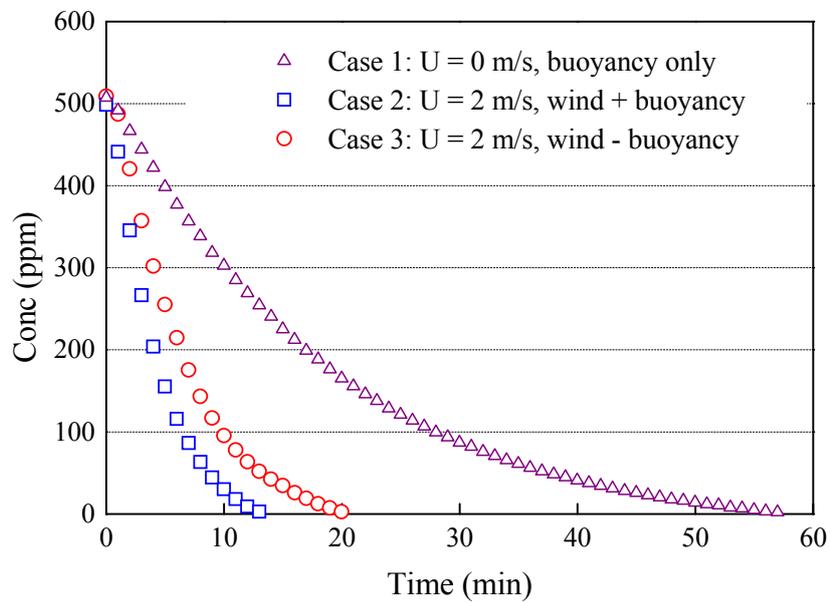


圖 4-19 模型內示蹤劑氣體隨時間衰減的濃度圖

資料來源：本研究整理

第五章 TAIVENT 計算模式

第一節 浮力通風計算模式

當室內有熱源（電器設備或人體）時，室內溫度便會上升。電器的發散熱量可由電器的功率來估算，一台個人電腦的散熱量為 160 W (Gratia et al., 2004)。人體的發散熱量則與人體的表面積、性別、活動狀態、室內氣溫有關(林憲德, 2009)。靜坐狀態下，成年男子的發散熱量約為 60 W；運動狀態下，發散熱量約為 100 W；平均而言，一個人的散熱量為 80 W。當室內氣溫高於室外氣溫，且建築物高處及低處皆有開口，室內熱空氣由高處開口流出，室外冷空氣由低處開口流入補充，造成熱浮力通風(Buoyancy-induced ventilation)。

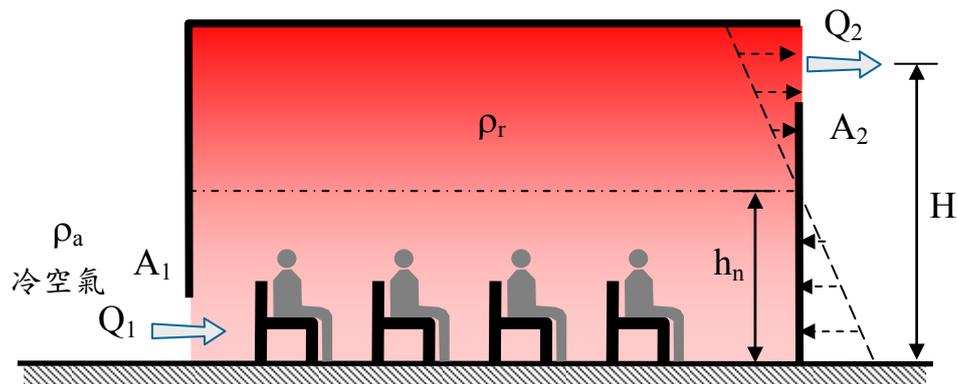


圖5-1 熱浮力通風之示意圖

資料來源：本研究整理

當室內有熱源時，熱源附近的空氣受熱而體積膨脹，密度變小，局部的密度差異所引起的浮力會促使熱空氣上升，形成浮流(plume)。若熱空氣蓄積在室內，會在室內形成溫度分層現象。若不考慮日照輻射及牆面、屋頂的熱量交換，室內氣溫 T_r 的變化遵守能量守恆定律：

$$\rho_a C_p V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \rho C_p Q_{in} T_a - \rho C_p Q_{out} T_r + H_{source} - H_{sink} \quad (5-1)$$

式中 ρ_a 為空氣密度，空氣的定壓比熱 $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ， V 為室內的體積， T_a 為室外氣溫， Q_{in} 、 Q_{out} 為流入、流出室內的流量， H_{source} 為室內熱源釋放熱量的強度， H_{sink} 為室內熱匯所吸收的熱量。若熱淨流量、熱源、熱匯隨時間變化，其所導致的熱浮力通風是非恆定的。若熱流量、熱源、熱匯互相抵銷，則室內溫度不隨時間而變，則其所導致的通風量是恆定的。

當室內無熱匯，且氣溫 T_r 恆定不變時，則室內熱源發出的熱量與由開口離開的淨流出熱量相等：

$$H_{source} = \rho C_p (T_r - T_a) Q \quad (5-2)$$

式中 Q 為空氣的體積流量。空氣密度與氣溫的關係可以狀態方程式計算：

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (5-3)$$

式中 P 為大氣壓力(Pa)， T 為絕對溫度($K = ^\circ C + 273.15$)， $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 為不含水汽之乾燥空氣的氣體常數(Gas constant)。一般大氣狀況下，大氣壓力 P 變化不大，氣溫對空氣密度的影響遠大於壓力的影響。

室內外氣溫不同時，空氣的密度即有差異，密度差異導致的室內外壓差便可驅動空氣流動。室內外壓差為零之高度稱為中性帶(Neutral level)。如圖 5-1 所示，高度低於中性帶之開口，空氣由室外向室內流動。依據 Gladstone and Woods (2001) 的理論，流量為：

$$Q_1 = C_{d1} A_1 \left(\frac{2 \Delta \rho g h_n}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (5-4)$$

式中 ρ_a 為室外空氣之密度， $\Delta \rho = \rho_a - \rho_r$ 為室內外空氣密度差異， g 為重力加速度， h_n 為室內中性帶之高度。 A 為開口面積， C_d 為流量係數(Discharge coefficient)，下標 1、2 代表低處與高處開口之意。高度高於中性帶之開口，空氣由內向外流動，流量為：

$$Q_2 = C_{d2} A_2 \left[\frac{2 \Delta \rho g (H - h_n)}{\rho_a} \right]^{1/2} \quad (5-5)$$

式中 H 為高處開口之高度。

當一棟建築物僅有兩個開口，因流體質量必須守恆，故流經開口的通風量：

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (5-6)$$

可得中性帶之高度：

$$\frac{h_n}{H} = \frac{\gamma^2}{1 + \gamma^2} \quad (5-7)$$

式中參數 γ 為開口面積之比值：

$$\gamma = \frac{C_{d2}A_2}{C_{d1}A_1} \quad (5-8)$$

當上下開口面積相同，流量係數也相同時，中性帶之高度：

$$h_n = \frac{H}{2} \quad (5-9)$$

代入(5-4)式或(5-5)式可得通風量為：

$$Q = C_d A \left[\frac{\Delta\rho g H}{\rho_a} \right]^{1/2} \quad (5-10)$$

將狀態方程式代入(5-10)式可得：

$$Q = C_d A \left[\frac{\Delta T g H}{T_a} \right]^{1/2} \quad (5-11)$$

式中 T_a 為室外氣溫， $\Delta T = T_p - T_a$ 為室內外氣溫差異。

若建築物僅有單一開口，依據 Brown and Solvason (1962) 及 Linden and Simpson (1985) 的實驗結果，熱浮力驅動之通風量為：

$$Q = \frac{C_d A}{3} \left[\frac{\Delta\rho g H}{\rho_a} \right]^{1/2} \quad (5-12)$$

依據 Hunt and Linden (1999) 的理論，在風壓及熱浮力同時作用下，流經建築物門窗開口的通風量為：

$$Q = A^* \left[\frac{\Delta P}{\rho} \pm \frac{\Delta\rho \cdot g}{\rho} (z - h_n) \right]^{1/2} \quad (5-13)$$

式中 $\Delta P = P_1 - P_2$ 為迎風面與背風面開口之壓差， z 為開口之高度。當熱浮力與風壓通風具加成效果時，壓差與密度差異之間採用加號。具抵銷效果時，採用減號。 A^* 為有效開口面積：

$$A^* = \frac{A_t \cdot A_b}{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{A_b^2}{C_t^2} + \frac{A_t^2}{C_b^2} \right) \right]^{1/2}} \quad (5-14)$$

式中 A 為開口面積，C 為流量係數(Discharge coefficient)，下標 b、t 分別為低處(bottom)與高處(top)開口之意。

建築物外部的表面壓力可以無因次之壓力係數表示：

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (5-15)$$

式中 U 為不受建築物影響之室外風速。

第二節 多區塊模式

本研究所發展的通風模式TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，可計算多區間建築物(Multi-room)風壓及熱浮力通風的通風量和換氣率。氣流在多區間建築物之中流動必須遵守質量守恆定律，亦即同一房間所有開口的通風量 Q_j 必須滿足連續方程式(Continuity eqn.)：

$$\sum_{j=1}^m \rho Q_j = 0 \quad (5-16)$$

其中 m 為該房間開口的數目，下標 j 表示第 j 個開口。以一棟矩形、單一樓層建築物為例，室內隔成 n 個房間，每個房間有 m 個開口，如圖 5-2 所示。當室外風速 U、外牆風壓係數 C_{pe} 、各個房間的氣溫、開口面積 A、高度位置皆為已知數，欲求各個房間的室內壓力 P_r ，再求取各個開口的通風量 Q。

在氣壓、氣溫變化很小的狀況下，可利用 Boussinesq 假設，忽略空氣密度 ρ 對流體質量的影響，故：

$$\sum_{j=1}^m Q_j = 0 \quad (5-17)$$

而流入房間的流量為正，流出為負。各開口的流量皆以式(5-13)計算：

$$Q_j = A_i^* \left[\left| \frac{(P_j - P_{ri})}{\rho} \pm \frac{\Delta\rho \cdot g}{\rho} (z - h_n) \right| \right]^{0.5} \quad (5-18)$$

其中 A_i^* 為第 i 個房間的有效開口面積， P_{ri} 表示第 i 個房間的室內壓力(Internal pressure)。代入式(5-17)可得：

$$\sum_{j=1}^m A_i^* \left[\left| \frac{(P_j - P_{ri})}{\rho} \pm \frac{\Delta\rho_i \cdot g}{\rho} (z_j - h_{ni}) \right| \right]^{0.5} = 0 \quad (5-19)$$

其中 z_j 為第 j 個開口的高度， h_{ni} 表示第 i 個房間的中性帶高度。

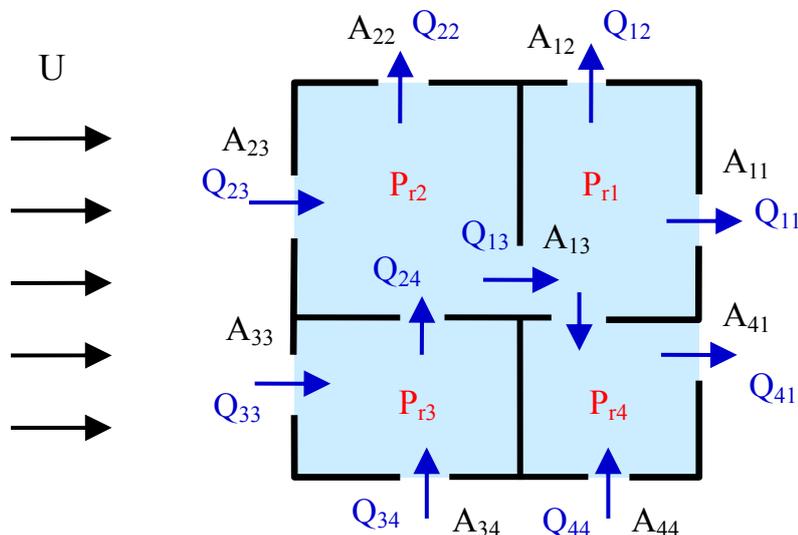


圖 5-2 建築物有室內隔間通風之平面圖

資料來源：本研究整理

當一建築物有 n 個房間數目時，便會有 n 個聯立的非線性方程式。當建築物有房間數目 n 和各房間開口數目 m 皆很大時，十分難解。本研究利用牛頓-拉福森法 (Newton-Raphson method) 藉由電腦程式以迭代的方式來計算。此法先針對第一個房間 ($i = 1$) 猜一個室內壓力 P_1 ，此值與正確室內壓力 P_r 的關係為：

$$P_r = P_1 + \Delta_1 \quad (5-20)$$

其中 Δ_1 表示第 1 個室內壓力的修正值。帶入上式可得：

$$\sum_{j=1}^m A_i^* \left[\left| \frac{(P_j - P_1 - \Delta_1)}{\rho} \pm \frac{\Delta \rho_i \cdot g}{\rho} (z_j - h_{ni}) \right| \right]^{0.5} = 0 \quad (5-21)$$

下標 j 代表第 j 個開口， m 為該房間的總開口數。將上式展開：

$$A_i^* (P_j - P_1 - \Delta)^{0.5} = A_i^* \left[(P_j - P_1)^{0.5} - \frac{\Delta}{2} (P_j - P_1)^{-0.5} + \frac{\Delta^2}{4} (P_j - P_1)^{-1.5} + \dots \right]$$

若 $(P_j - P_1) \gg \Delta_1$ ，則 Δ_1 二階以上各項可忽略。上式變為：

$$\sum_{j=1}^m \left[A_i^* (P_j - P_1)^{0.5} - \frac{\Delta}{2} A_i^* (P_j - P_1)^{-0.5} \right] = 0 \quad (5-23)$$

因此壓力修正值：

$$\Delta = \frac{2 \sum_{j=1}^m A_i^* (P_j - P_1)^{0.5}}{\sum_{j=1}^m A_i^* (P_j - P_1)^{-0.5}} \quad (5-24)$$

修正後的壓力 P_r 可能仍無法滿足連續方程式，因此必須重複以上的步驟計算第二次、第三次修正值，再計算下一次迭代的室內壓力 P_{r1} ：

$$P_{r1}(k+1) = P_{r1}(k) + \Delta_1(k) \quad (5-25)$$

其中 $\Delta_1(k)$ 表示第 1 個室內壓力的第 k 次修正值，直到所得之壓力值 P_{r1} 收斂 ($|P_{r1} - P_{r1}(k)| < 0.001$) 為止。為了加速室內壓力收斂的速度，本研究將壓力修正值乘上一個鬆弛係數 (Relaxation coefficient) r ，其值範圍為 $r < 1$ 。第 1 個室內壓力計算完之後，可再利用相同的方法計算另一個房間的壓力：

$$P_{ri}(k+1) = P_{ri}(k) + r \cdot \Delta_i(k) \quad (5-26)$$

如此下去直到整棟建築物所有房間的室內壓力都計算出為止。

第三節 TAIVENT 模式介紹

本計畫延續民國 99 年建築研究所發展的自然通風模式 TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，加入熱浮力通風計算模組，稱為 TAIVENT 2.0 版。為了方便使用者輸入建築物的相關參數，利用 Visual Basics 程式語言寫了一個 Windows 中文介面程式，通風流量的計算則採用 Fortran 程式撰寫。TAIVENT 模式的使用者僅需在 Windows 介面上輸入建築物的相關參數，便可執行建築物通風量的計算，最後再將計算得之通風量和換氣率存入指定的檔案內即可。

以下針對 Windows 介面的使用做一簡單介紹：圖 5-3 為通風模式 TAIVENT 2.0 版的首頁，按下一頁即可進入建築物座落位置與環境參數的輸入介面，圖 5-4 為建築物座落位置與環境參數的輸入介面，建築物座向的定義為建築物大門與正北方的夾角，即為圖中的 α ，建築物座向為逆時針旋轉。而風向為順時針旋轉，座向與風向的夾角為兩者的絕對值相加。此 Windows 介面的使用者可以點選下拉式選單選擇建築物座落的縣市，選擇完後各地的環境參數(平均風向、盛行風向)會自動顯示於螢

幕上，使用者只需在輸入建築物座向即可再按下一頁。圖 5-5 為建築物尺寸參數的輸入介面，可輸入建築物的樓層尺寸與每個房間的尺寸大小，按下確定鍵模式可以自動算出樓層與各房間體積，再按下一頁進入建築物外部開口參數的設定。圖 5-6 為建築物外部開口參數的輸入介面，開口的順序以大門（或落地窗）的面為第一個面，逆時鐘旋轉依序增加，在介面中分別輸入開口正中心的水平與垂直座標，然後設定每個開口的尺寸。而介面中可以選擇此外部開口是否有裝設紗網或百葉窗，若無點選擇便是開口無加裝物，再按確定鍵即可跳入下一頁。圖 5-7 為建築物室內外氣溫參數的輸入介面，圖 5-8 為 TAIVENT 2.0 版的輸入檔與計算結果儲存介面，在介面顯示輸入相關參數，並以文字檔(Text file)的形式儲存中於指定的檔案中，按下執行 Fortran 計算程式鍵後模式便會開始計算通風量的結果，然後將計算結果以文字檔的形式儲存中於指定的檔案中。且可以在介面中看出每個房間的室內壓力、各開口的通風量。



圖 5-3 通風模式 TAIVENT 2.0 版的首頁

資料來源：本研究整理

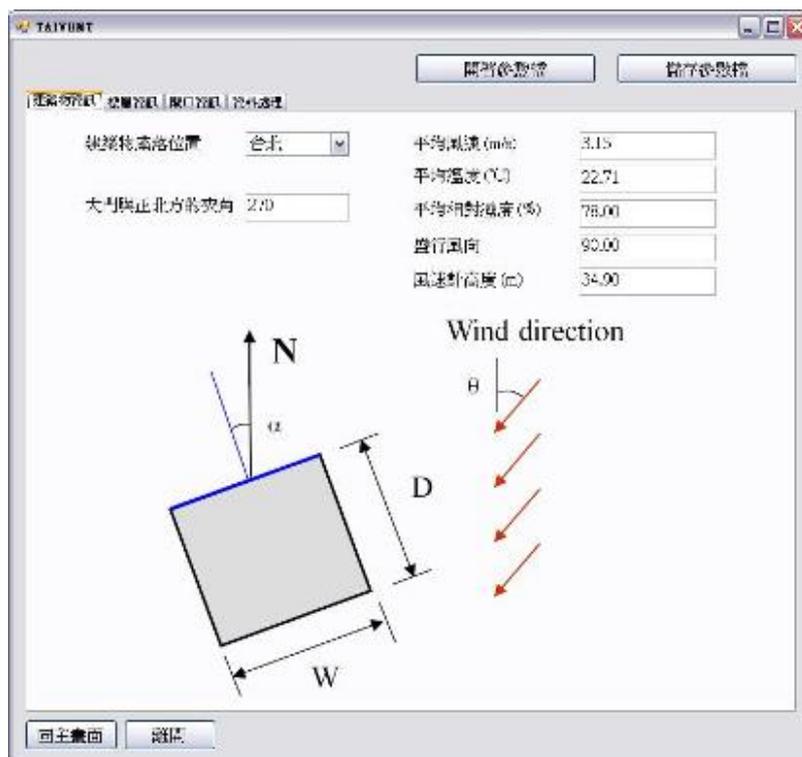


圖 5-4 建築物座落位置與環境參數的輸入介面

資料來源：本研究整理

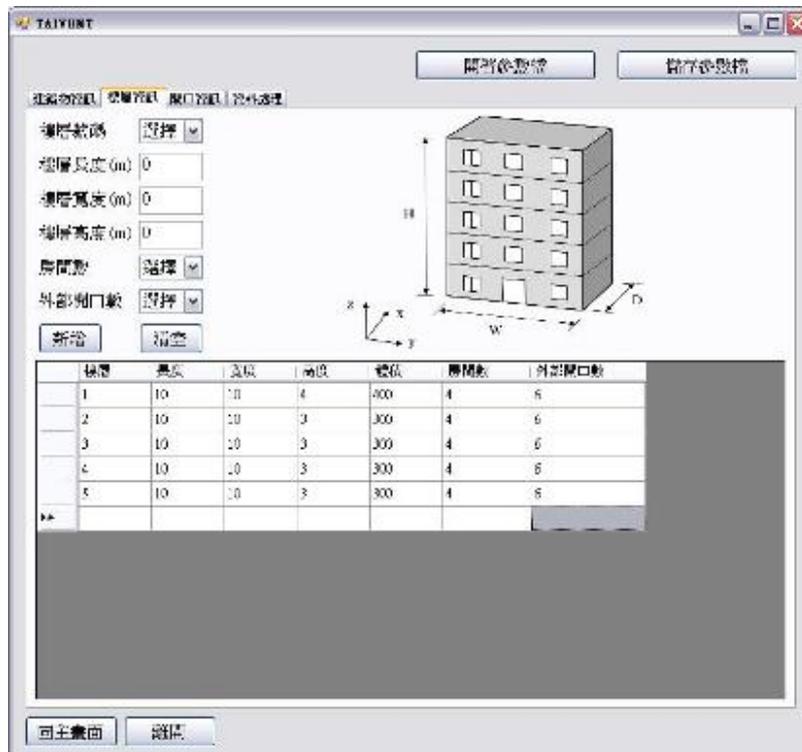


圖 5-5 建築物尺寸參數的輸入介面

資料來源：本研究整理

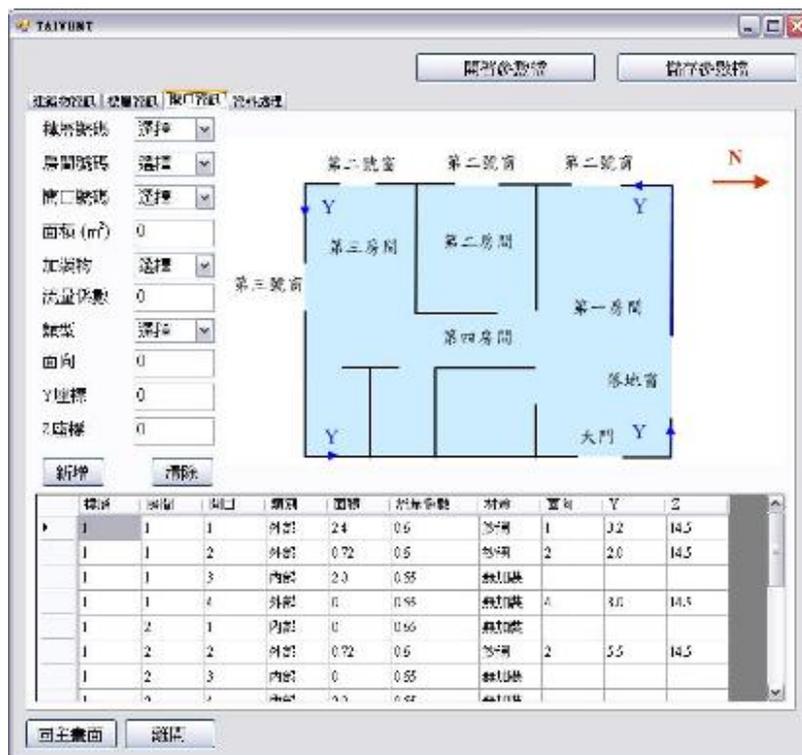


圖 5-6 建築物開口參數的輸入介面

資料來源：本研究整理圖

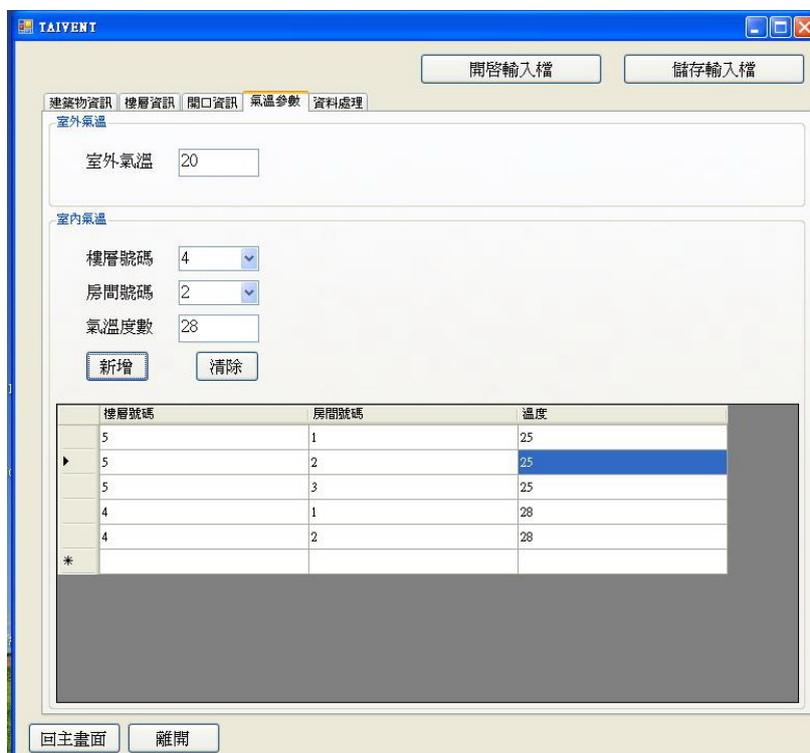


圖 5-7 建築物溫度參數的輸入介面

資料來源：本研究整理



圖 5-8 TAIVENT 輸入檔與計算結果儲存介面

資料來源：本研究整理

第六章 浮力通風案例

本章利用模式 TAIVENT 2.0 模式計算熱浮力與風壓同時作用下的建築物通風，並以案例說明自然通風的特性。案例 A 為一棟室內無隔間之建築物，建築物的地板面積 100 m^2 (長度與寬度皆為 10 m)，周遭無其他影響風場之建築物，建築物迎風面、背風面各有一個開口，建築兩側外牆無開口，如圖 6-1。

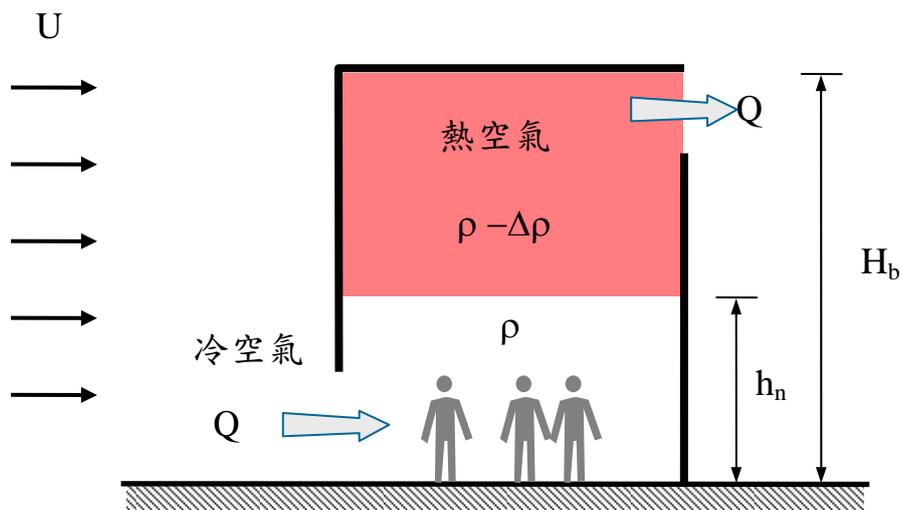


圖 6-1 具加成效果之熱浮力與風壓通風

資料來源：本研究整理

1. 案例 A1：

迎風面開口位於低處，面積 $A = 1.0 \text{ m}^2$ (門)，背風面開口位於高處，面積 $A = 1.0 \text{ m}^2$ (氣窗)。兩開口的流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。居室內部高度為 4.0 m ，高處開口接近屋頂，利用(5-7)式可計算得中性帶之高度 $h_n = 0.5H_b = 2.0 \text{ m}$ ，有效開口面積 $A^* = 0.65 \text{ m}^2$ 。由風洞實驗之結果可知無障礙物影響之建築物迎風面開口處的风壓係數 $C_{pe1} = 0.50$ ，背風面的風壓係數 $C_{pe2} = -0.36$ 。

假設室外氣溫 22°C ，室內高處氣溫 27°C 。在一個標準大氣壓力 ($P = 101.3 \text{ kPa}$) 下，可求得室外空氣密度 $\rho = 1.196 \text{ kg/m}^3$ ，室內空氣密度 $\rho = 1.176 \text{ kg/m}^3$ ，密度差異造成之浮力加速度 $g\Delta\rho/\rho = 0.166 \text{ m/s}^2$ 。假設室外風速 $U = 0 \sim 5.0 \text{ m/s}$ 之間，求取在不同風速下的通風量與小時換氣率，計算結果顯示於圖 6-2 及表 6-2。實線為室

內外溫差為 5 °C 之結果，虛線為室內外溫差為 0 °C (風壓通風) 之結果，由圖 6-2 可看出 ACH 介於 0~20 hr⁻¹，且室外風速愈大，室內外有溫差之換氣率愈接近室內外無溫差之結果。當室外風速 $U > 3$ m/s，熱浮力對通風之影響可忽略。

表 6-1 建築物之尺寸與室內外氣溫

| 建築物 | 尺寸 (m) |
|---------|--------------------|
| 地板面積 | 100 m ² |
| 居室高度 | H (m) |
| 迎風面開口面積 | 1.0 m ² |
| 背風面開口面積 | 1.0 m ² |
| 室外氣溫 | 22 °C |
| 室內氣溫 | 27 °C |

(資料來源：本研究整理)

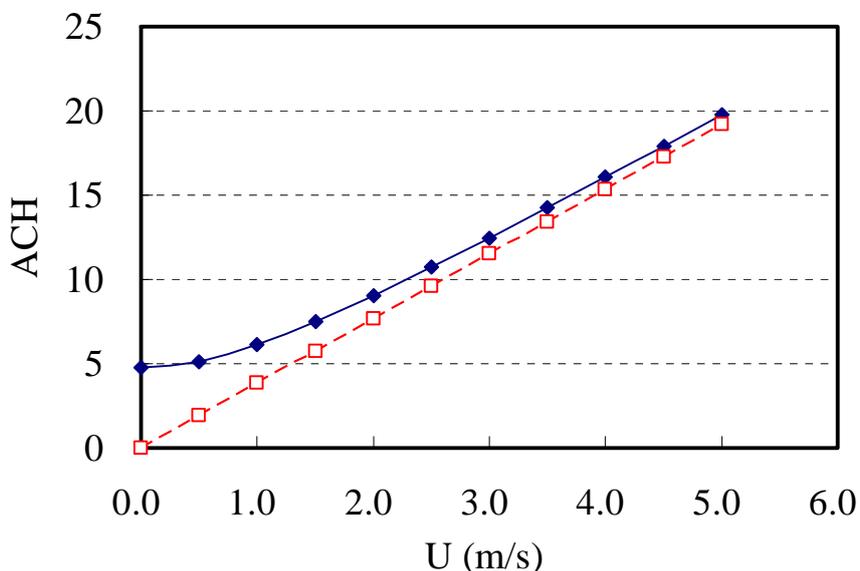


圖 6-2 室外風速對換氣率之影響 (實線為室內外溫差 $\Delta T = 5$ °C 之結果，
虛線為室內外溫差 $\Delta T = 0$ °C 之結果)

資料來源：本研究整理

表 6-2 室外風速對建築物換氣率之影響

| U (m/s) | $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
|---------|--|-------|--|-------|
| | Q (m ³ /s) | ACH | Q (m ³ /s) | ACH |
| 0 | 0.530 | 4.77 | 0.000 | 0.00 |
| 0.5 | 0.571 | 5.14 | 0.213 | 1.92 |
| 1.0 | 0.680 | 6.12 | 0.426 | 3.84 |
| 1.5 | 0.830 | 7.47 | 0.639 | 5.75 |
| 2.0 | 1.004 | 9.03 | 0.852 | 7.67 |
| 2.5 | 1.190 | 10.71 | 1.066 | 9.59 |
| 3.0 | 1.384 | 12.46 | 1.279 | 11.51 |
| 3.5 | 1.583 | 14.25 | 1.492 | 13.43 |
| 4.0 | 1.785 | 16.07 | 1.705 | 15.34 |
| 4.5 | 1.990 | 17.91 | 1.918 | 17.26 |
| 5.0 | 2.196 | 19.76 | 2.131 | 19.18 |

資料來源：本研究整理

2. 案例 A2：

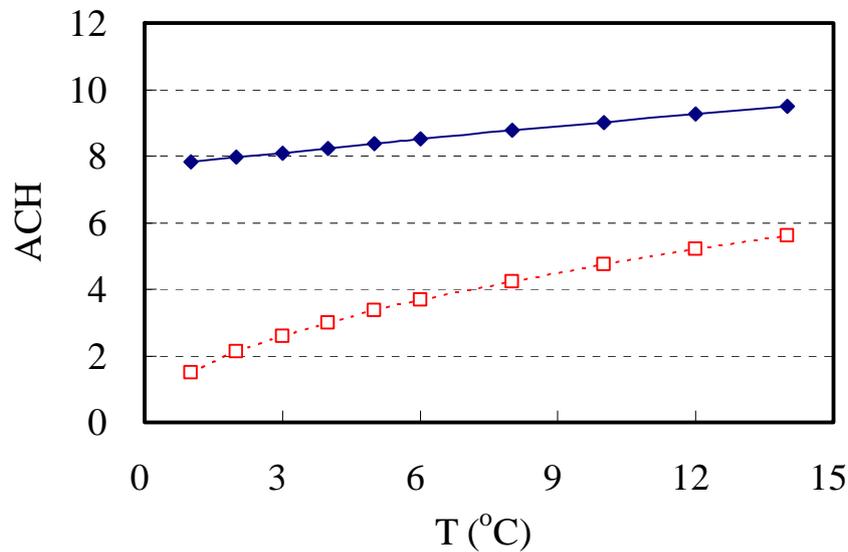


圖 6-3 室內外溫差對換氣率之影響（實線為風速 $U = 2.0\text{ m/s}$ 之結果，
虛線為風速 $U = 0$ 之結果）

資料來源：本研究整理

假設室外氣溫 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，室外風速 $U = 2.0\text{ m/s}$ ，居室高度 $H_b = 4.0\text{ m}$ ，中性帶離

高處開口之距離 2.0 m，室內外溫差介於 0 ~ 14 °C 之間，求取在不同溫差下的通風量與小時換氣率，圖 6-3 中實線為室外風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 之結果，虛線為室外風速 $U = 0$ 之結果。結果顯示溫差愈大，換氣率愈大。

表 6-3 室內外溫差對建築物換氣率之影響

| ΔT (°C) | U = 2.0 m/s | | U = 0 m/s | |
|-----------------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | Q (m ³ /s) | ACH | Q (m ³ /s) | ACH |
| 0 | 0.852 | 7.67 | 0.000 | 0.00 |
| 1 | 0.869 | 7.82 | 0.167 | 1.50 |
| 2 | 0.884 | 7.96 | 0.236 | 2.12 |
| 3 | 0.900 | 8.10 | 0.289 | 2.60 |
| 4 | 0.915 | 8.24 | 0.333 | 3.00 |
| 5 | 0.930 | 8.37 | 0.373 | 3.36 |
| 6 | 0.945 | 8.51 | 0.408 | 3.68 |
| 8 | 0.974 | 8.77 | 0.472 | 4.24 |
| 10 | 1.002 | 9.02 | 0.527 | 4.75 |
| 12 | 1.030 | 9.27 | 0.578 | 5.20 |
| 14 | 1.056 | 9.51 | 0.624 | 5.62 |

資料來源：本研究整理

3. 案例 A3：

假設室外氣溫 22 °C，室內高處氣溫 27 °C，室外風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ ，建築物高度介於 2 ~ 30 m 之間，探討建築物高度 H_b 對換氣率之影響。圖 6-4 中實線為風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 之結果，虛線為 $U = 0 \text{ m/s}$ 之結果（浮力通風）。結果顯示建築物高度愈大，換氣率愈小，這是因為建築物高度變大，浮力通風量 Q 會變大，但室內體積亦隨之增加，故導致換氣率變小。

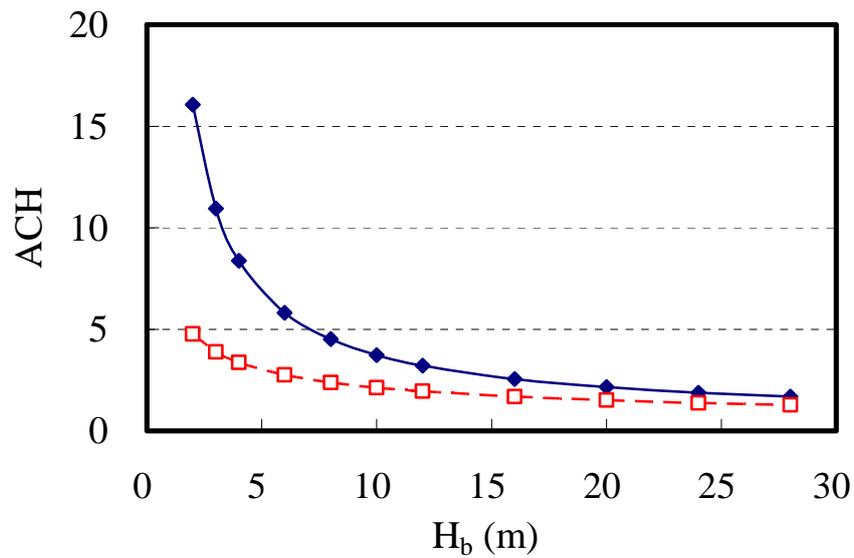


圖 6-4 建築物高度對換氣率之影響（實線為風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 之結果，
虛線為風速 $U = 0$ 之結果）

資料來源：本研究整理

表 6-4 建築物高度對建築物換氣率之影響

| H (m) | U = 2.0 m/s | | U = 0 m/s | |
|-------|-----------------------|-------|-----------------------|------|
| | Q (m ³ /s) | ACH | Q (m ³ /s) | ACH |
| 2 | 0.893 | 16.07 | 0.265 | 4.77 |
| 3 | 0.912 | 10.95 | 0.325 | 3.89 |
| 4 | 0.931 | 8.38 | 0.375 | 3.37 |
| 6 | 0.968 | 5.81 | 0.459 | 2.75 |
| 8 | 1.004 | 4.52 | 0.530 | 2.38 |
| 10 | 1.038 | 3.74 | 0.593 | 2.13 |
| 12 | 1.071 | 3.21 | 0.649 | 1.95 |
| 16 | 1.135 | 2.55 | 0.749 | 1.69 |
| 20 | 1.195 | 2.15 | 0.838 | 1.51 |
| 24 | 1.253 | 1.88 | 0.918 | 1.38 |
| 28 | 1.308 | 1.68 | 0.991 | 1.27 |

資料來源：本研究整理

4. 案例 B1：

案例 B 為一棟室內無隔間之建築物，建築物的地板面積 100 m^2 （長度與寬度皆為 10 m ），周遭無其他影響風場之建築物。迎風面開口（面積 $A = 1.0 \text{ m}^2$ ）在高處，背風面開口（面積 $A = 1.0 \text{ m}^2$ ）在低處，如圖 6-5 所示。迎風面開口處的風壓係數 $C_{pe1} = 0.88$ ，背風面的風壓係數 $C_{pe2} = -0.36$ 。兩開口的流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 0.65 \text{ m}^2$ 。熱浮力驅使熱空氣由建築物高處開口（迎風面開口）流出，冷空氣由建築物低處開口（背風面開口）流入補充。但風壓力驅使空氣由迎風面開口流入，背風面開口流出，熱浮力與風壓通風效果互相抵銷。

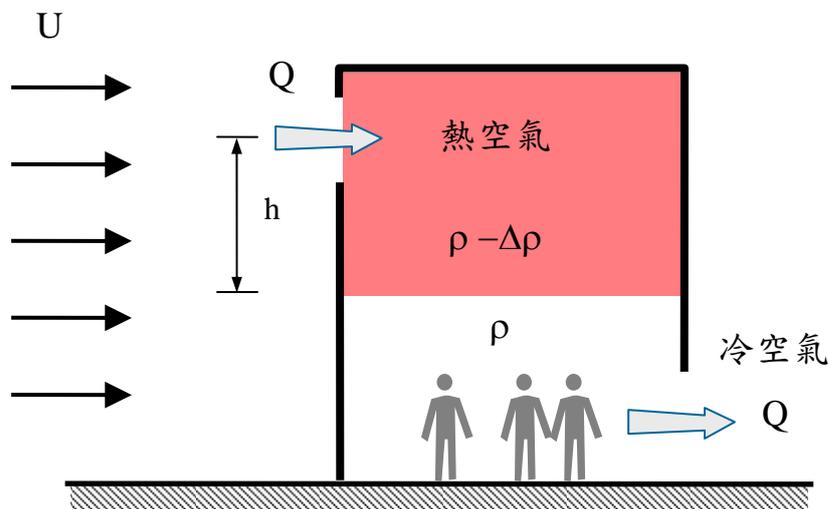


圖 6-5 具抵銷效果之熱浮力與風壓通風

資料來源：本研究整理

假設室外氣溫 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ，室內高處氣溫 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ，居室高度 $H_b = 4.0 \text{ m}$ ，室內溫度界面離高處開口之距離 $h = 2.0 \text{ m}$ ，室外風速 $U = 0 \sim 5.0 \text{ m/s}$ 之間，計算不同室外風速下的通風量與小時換氣率。圖 6-6 的實線為室內外溫差 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 之結果，虛線室外無溫差（風壓通風）之結果。可看出室外風速 $U < 1.0 \text{ m/s}$ 時，熱浮力與風壓具抵銷效果。但室外風速 $U > 3.0 \text{ m/s}$ 時，熱浮力對通風之影響可完全忽略，風壓通風為主要的影響參數。

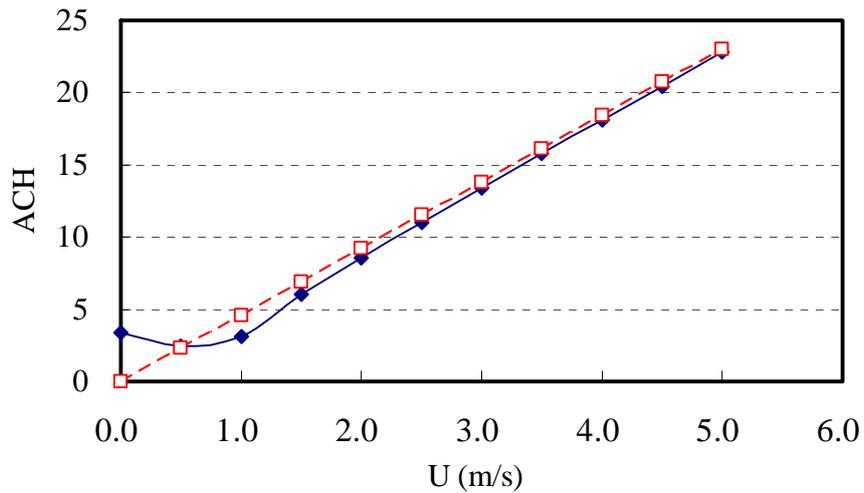


圖 6-6 室外風速對具抵銷效果之浮力與風壓通風的影響（實線為室內外溫差 $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之結果，虛線為 $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之結果）

資料來源：本研究整理

表 6-5 室外風速對建築物換氣率之影響

| U (m/s) | $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
|---------|--|-------|--|-------|
| | Q (m ³ /s) | ACH | Q (m ³ /s) | ACH |
| 0 | 0.375 | 3.37 | 0.000 | 0.00 |
| 0.5 | 0.274 | 2.46 | 0.256 | 2.30 |
| 1.0 | 0.349 | 3.14 | 0.512 | 4.61 |
| 1.5 | 0.670 | 6.03 | 0.768 | 6.91 |
| 2.0 | 0.953 | 8.57 | 1.024 | 9.21 |
| 2.5 | 1.223 | 11.01 | 1.280 | 11.52 |
| 3.0 | 1.489 | 13.40 | 1.535 | 13.82 |
| 3.5 | 1.752 | 15.77 | 1.791 | 16.12 |
| 4.0 | 2.013 | 18.11 | 2.047 | 18.43 |
| 4.5 | 2.272 | 20.45 | 2.303 | 20.73 |
| 5.0 | 2.531 | 22.78 | 2.559 | 23.03 |

資料來源：本研究整理

5. 案例 B2：

假設室外氣溫 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，室外風速 $U = 2.0\text{ m/s}$ ，居室高度為 4.0 m ，室內溫度界面離高處開口之距離 $h = 2.0\text{ m}$ ，室內外溫差 ΔT 介於 $0 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之間，計算不同溫差

下的通風量與小時換氣率，圖 6-7 中實線為室外風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 之結果，虛線為室外風速 $U = 0 \text{ m/s}$ 之結果（浮力通風）。結果顯示浮力通風的狀況下，溫差愈大，換氣率愈大。

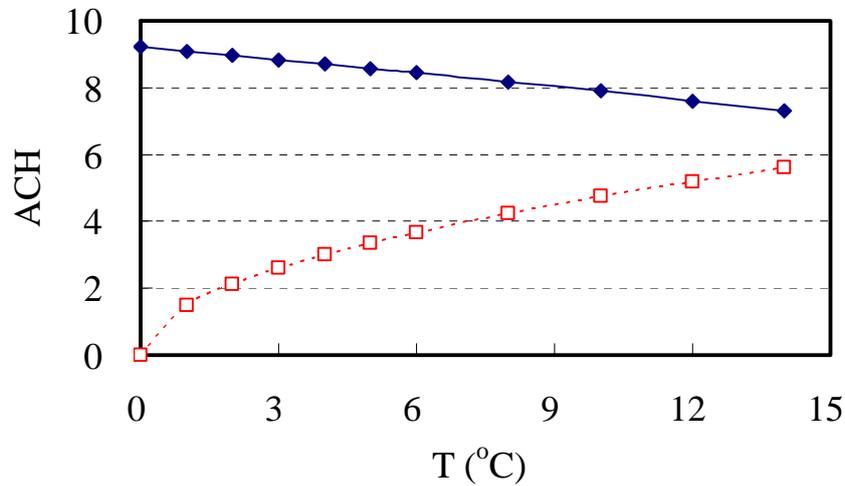


圖 6-7 室內外溫差對具抵銷效果之浮力與風壓通風的影響（實線為風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 之結果，虛線為風速 $U = 0$ 之結果）

資料來源：本研究整理

表 6-6 室內外溫差對建築物換氣率之影響

| ΔT (°C) | U = 2.0 m/s | | U = 0 m/s | |
|-----------------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | Q (m ³ /s) | ACH | Q (m ³ /s) | ACH |
| 0 | 1.024 | 9.21 | 0.000 | 0.00 |
| 1 | 1.010 | 9.09 | 0.167 | 1.50 |
| 2 | 0.996 | 8.96 | 0.236 | 2.12 |
| 3 | 0.982 | 8.84 | 0.289 | 2.60 |
| 4 | 0.968 | 8.71 | 0.333 | 3.00 |
| 5 | 0.953 | 8.58 | 0.373 | 3.36 |
| 6 | 0.939 | 8.45 | 0.408 | 3.68 |
| 8 | 0.909 | 8.18 | 0.472 | 4.24 |
| 10 | 0.877 | 7.90 | 0.527 | 4.75 |
| 12 | 0.845 | 7.61 | 0.578 | 5.20 |
| 14 | 0.812 | 7.30 | 0.624 | 5.62 |

資料來源：本研究整理

6. 案例 B3：

假設室外氣溫 22 °C，室內高處氣溫 27 °C，室外風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ ，建築物高度 H_b 介於 2 ~ 28 m 之間，探討建築物高度對換氣率之影響，計算結果見表 6-4。圖 6-8 中實線為風速 $U = 2.0 \text{ m/s}$ 之結果，虛線為 $U = 0 \text{ m/s}$ (浮力通風) 之結果。此圖顯示建築物高度愈大，換氣率愈小，這是因為建築物高度變大，雖然浮力通風量 Q 會變大，但室內體積亦隨之增加，故導致換氣率變小。

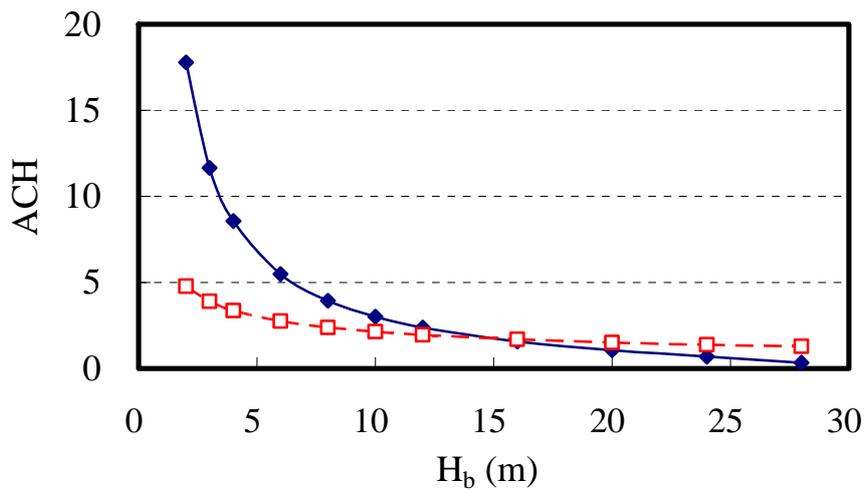


圖 6-8 建築物高度對具抵銷效果之浮力與風壓通風的影響 (實線為室內溫差 $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 之結果，虛線為 $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 之結果)

資料來源：本研究整理

由以上的計算結果可知：不論風壓通風或熱浮力通風，建築物開口面積為最主要影響通風量之參數，也是最容易控制之參數。建築物若想充分利用自然通風，建築物應該在盛行風向的迎風面、背風面皆有大型開口。開口面積愈大，有效面積 A^* 愈大，通風量愈大。建築物應多設置使用者可自行開關的門窗，以利自然通風之利用。若想利用熱浮力通風，建築物應該在高處及低處皆有大型開口，且室內要有熱源。依據建築技術規則建築設計施備編(2009)第 102 條訂定之起居室、臥室、私人辦公室單位樓地板面積最小的換氣量為 $8.0 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ，計算得此流況下之 $\text{ACH} = 1.95$ 。由表 6-4 的結果可知：各個風向的換氣量皆滿足建築技術規則的標準。

表 6-7 建築物高度對建築物換氣率之影響

| H (m) | U = 2.0 m/s | | U = 0 m/s | |
|-------|-----------------------|-------|-----------------------|------|
| | Q (m ³ /s) | ACH | Q (m ³ /s) | ACH |
| 2 | 0.989 | 17.80 | 0.265 | 4.77 |
| 3 | 0.971 | 11.65 | 0.325 | 3.89 |
| 4 | 0.953 | 8.57 | 0.375 | 3.37 |
| 6 | 0.915 | 5.49 | 0.459 | 2.75 |
| 8 | 0.876 | 3.94 | 0.530 | 2.38 |
| 10 | 0.835 | 3.00 | 0.593 | 2.13 |
| 12 | 0.792 | 2.37 | 0.649 | 1.95 |
| 16 | 0.697 | 1.57 | 0.749 | 1.69 |
| 20 | 0.588 | 1.06 | 0.838 | 1.51 |
| 24 | 0.453 | 0.68 | 0.918 | 1.38 |
| 28 | 0.255 | 0.33 | 0.991 | 1.27 |

資料來源：本研究整理

7. 案例 C：

本研究並以成功大學的「孫運璿綠建築研究大樓-綠色魔法學校」的國際會議廳為案例，計算大型室內空間的自然通風可行性。依據林憲德教授所指導的碩士學生簡君翰(2009)之論文：該會議廳內部空間大小為：長度 25.6 m，寬度 16.7 m，高度 12 m，廳內的容積 2773 m³。廳內最多可容納 200 人，每人每小時發熱量 70 W，燈具全開發熱量 6280 W。該建築物並設計一個太陽能通風塔促進熱浮力之效益，在日射量 120 W m⁻² hr⁻¹，集熱量 9360 W。室內開口高程差 5.7 m，通風塔開口高程差 9.0 m。簡君翰(2009)利用計算流體力學模式探討各種使用狀況下自然通風的效益，其結果顯示：會議廳在春秋季有良好的舒適度，無需使用空調，每年可節能 22.6% 電力。

本計畫利用 TAIVENT 2.0 模式評估該會議廳的熱浮力通風狀況，簡君翰(2009)中的數據：講台進氣口總面積 5.12 m²，後方出風口面積 14.22 m²，通風塔出風口面積 18.08 m²，流量係數皆設定為 C_d = 0.65 可計算得：在外氣溫度 23 °C，廳內高處(觀眾席後三排)氣溫 28 °C，室外風速 U = 0 m/s 各種使用狀況下，自然通風量列於表 6-8，計算結果與簡君翰(2009)利用 CFD 模式得到之通風量與換氣率相近。

表 6-8 魔法學校會議廳自然通風量與換氣率之比較

| 項目 | 狀況 | 無室內發散熱 | 白天使用 | 夜間使用 |
|------------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | 總發熱量 | 9360 W | 29640 W |
| 重要參數 | 內外溫差 | 2 °C | 5 °C | 4 °C |
| | 進口面積 A_1 | 3.45 m ² | 5.12 m ² | 5.12 m ² |
| | 出口面積 A_2 | 18.08 m ² | 18.08 m ² | 14.22 m ² |
| | 高度差 H | 9.0 m | 9.0 m | 5.7 m |
| CFD 模式 | 通風量 | 2.79 m ³ /s | 6.34 m ³ /s | 5.17 m ³ /s |
| | 換氣率 | 3.62 | 8.23 | 6.72 |
| TAIVENT 模式 | 通風量 | 2.45 m ³ /s | 5.29 m ³ /s | 4.02 m ³ /s |
| | 換氣率 | 3.18 | 6.86 | 5.22 |

資料來源：本研究整理

第七章 結論與建議

第一節 結論

本年度計畫共完成了三個研究成果：

1. 分析整理台北、台中、台南及高雄四個都會區 1961~2008 年的氣象資料(風速、風向、氣溫、濕度)，並利用林憲德(2009)所建議之通風利用率計算方式計算全台灣 25 個氣象站的自然通風利用率。結果顯示風壓通風的利用率皆高於熱浮力通風利用率，都會區兩者合計在 40%以上。
2. 利用內政部建築研究所的風洞實驗室及多頻道壓力掃描計量測受到不透風式擋風牆影響之矩形建築物的表面風壓分佈。並以加熱板及示蹤劑濃度衰減法研究受熱浮力驅動之通風量，實驗結果可供模式驗證之用。
3. 修改多區間建築物通風計算模式 TAIVENT，加入熱浮力通風的計算模組，可計算浮力及風壓同時作用下的通風量和換氣率。最後利用通風模式計算台灣地區常見之建築物及成功大學的「孫運璿綠建築研究大樓-綠色魔法學校」的國際會議廳在各種使用狀況下的通風量與換氣率，以說明自然通風的特性。

研究結果發現：視風向與開口高低位置而定，風壓與熱浮力有時具有加成效果，有時則會互相抵銷。一般住宅，室外風速大於 3 m/s，風壓通風的效果大於熱浮力通風之功效，熱浮力對通風之影響可忽略不計。但不論風壓通風或熱浮力通風，建築物開口面積為最主要影響通風量之參數，也是最容易控制之參數。建築物應多設置使用者可自行開關的門窗，以利自然通風之利用。

本研究所發展的 TAIVENT 2.0 模式目前僅考慮自然通風對建築物室內通風的影響，無法計算機械通風之通風量。TAIVENT 2.0 模式不適用的狀況包括有：

- (1) 使用通風機械（抽風機、送風機、冷氣機、中央空調）的建築物。
- (2) 門窗縫隙的滲漏風量過大之建築物。
- (3) 建築物外型為非矩形之建築物。

未來可利用 TAIVENT 模式之架構，加入滲隙風與機械通風，擴充 TAIVENT 模式適用的狀況。此外，風洞實驗僅量測矩形建築物的表面風壓分佈，其他外型的建築物及周遭有影響風場的建築物之表面風壓可藉由風洞模型實驗或計算流體動力學模

式求得，再輸入到 TAIVENT 模式中，來計算建築物的通風量與換氣率。後續的研究可讓 TAIVENT 模式更成熟的發展，更廣泛地應用在台灣地區各種建築物通風設計。

第二節 建議

根據本計畫的研究成果，研究單位在此提出下列具體建議，以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

建議一

研究集合式住宅對自然建築物通風的影響：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

台灣都會區的住宅大多屬於密集興建的公寓、高層住宅大樓等集合式住宅 (Multi-family dwelling unit)。這類的集合式建築往往過於密集，會影響建築物的自然通風，前人的通風研究皆未針對此問題進行深入的研究。因此可利用風洞實驗或計算流體力學模式探討集合式住宅的自然通風特性，研究各種常見排列方式、間距、座向等建築設計對風壓通風的影響，以找出最能利用當地的氣象條件之通風設計。

建議二

研究室內障礙物對建築物通風的影響：長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

本研究所發展的 TAIVENT 模式目前可以計算建築物各種室內隔間的通風量與換氣率，但無法計算室內有大型障礙物，如屏風、書架、傢俱、樑柱或辦公室隔間 (Partition) 等的通風量。不僅 TAIVENT 模式無法考慮室內障礙物，國外所發展的多區塊模式亦無法計算室內障礙物對於通風量的影響。因此未來可採用阻抗模式 (Resistance model)，研究各種常見傢俱對氣流所造成的阻抗，再計算對建築物通風量影響的程度，讓設計者可以清楚的知道室內阻抗如何影響建築物通風量與換氣率。

附錄一 期中審查會議記錄與回應

內政部建築研究所 100 年度研究計畫「熱浮力效應對建築物室內通風之研究」
期中審查會議紀錄

- 一、日期：100 年 8 月 5 日（星期五）上午 9 時 30 分
- 二、地點：大坪林聯合辦公大樓 13 樓第一會議室
- 三、主持人：陳副所長瑞鈴
- 四、記錄：劉文欽、黎益肇

審查意見回應對照表

| 審查委員 | 審查意見 | 回應 |
|--------|--|---|
| 曹建築師昌勝 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 一般建築物樓高約為 3 至 6 公尺，且在不同隔間、窗戶形式以及有無天花板之情形均會影響通風之結果，應上述狀況納入考慮。 2. 本研究之成果能否納入綠建築評估？ | <ol style="list-style-type: none"> 1.住宅型建築物高約 3~6 公尺，但中庭挑高建築物，如百貨公司、旅館等內部高度可達 20~50 公尺。本計畫會將台灣常見隔間、窗戶形式考慮在內。 2. 台灣綠建築評估制度中未針對熱浮力自然通風有定量之計算方式，本研究可補足此遺憾。 |
| 周教授榮華 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究熱浮力效應之理論模型是否有考量到氣流上升而溫度下降之現象。 2. 建議本研究可與成大林憲德教授之實場量測及模擬結果相互比對驗證，增加本模式之可靠度。 | <ol style="list-style-type: none"> 1.浮力效應會驅使熱空氣在上，冷空氣在下。若建築物高處有開口，熱空氣便會流出，室內氣溫便會下降。開口的位置、形式會影響室內氣流是否順利流出或滯留於室內。 2. 會與成大林憲德教授聯絡，取得實場量測及模擬結果，相互比對驗證。 |

| 審查委員 | 審查意見 | 回應 |
|-------|--|--|
| 張教授景鐘 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案為去年研發 TAIVENT 模式之延續，除風壓通風外，本年度增加溫差熱浮力效應通風，使本模式更完整，實用性更高。 2. 溫差熱浮力效應會隨時間稱長而減小，建議可增加換氣率之影響討論。 3. 報告書 P.61 表 5.2 及圖 5.3 中 $\Delta T = 0$ 時，結果直接為 0 或空白，請更正補充。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 熱浮力通風、室內溫度會隨室內熱源、對外開口之變化而變動。一段時間之後便會達到恆定狀態，本研究僅探討恆定狀態之熱浮力通風及換氣率。 3. 期中報告書誤植部分將會在期末報告中修正。 |
| 陳教授若華 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究擴大 TAIVENT 模式的適用性，並極具參考價值。 2. P.53 公式(4-7)中 C_{dj} 代表何意義？請於文中加以說明。 3. 公式(4-1)~(4-7)的推導過程是否完整考量熱浮力效應，請將推導過程更詳細的說明列出。 4. 本研究採用建物內部高度差來做天井設計，是否能夠表達垂直動線上的隔間之影響？ | <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. C_{dj} 為第j個開口的流量係數，會在期末報告中說明。 3. 期中報告書公式推導過程將會在期末報告中詳細的列出。 4. 期中報告之案例未考慮建築物室內垂直動線上的隔間對浮力通風之影響。 |
| 謝教授俊民 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 請列出 TAIVENT 模式中所使用建物參數之詳細設定表，例如樓地板面積、及開窗率等。 2. 由於建物類型對於室內通風有一定程度之影響，研究中是否可加入北中南常見建物類型之說明。 3. 在台灣氣象資料章節中採用區域分析方式導入計算，但與實際建築周圍之風場微氣候應有所不同，請敘述微氣候資料庫建構之必要性。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 期末報告會以表格的方式列出建物之參數。 2. 本研究將會針對常見之建物類型（公寓、大樓）之通風進行探討。 3. 實際建築物周圍之微氣候、風場受當地街廓、建物高度、走向等影響，皆不相同。本研究無法針對台灣每一都市的每一街廓之微氣候建構其資料庫。 |

附錄二 期末審查會議記錄與回應

內政部建築研究所 100 年度研究計畫「熱浮力效應對建築物室內通風影響之研究」期末審查會議紀錄

- 一、日期：100 年 11 月 16 日（星期三）上午 9 時 30 分
- 二、地點：大坪林聯合辦公大樓 15 樓第一會議室
- 三、主持人：陳所長瑞鈴
- 四、記錄：劉文欽、黎益肇

審查意見回應對照表

| 審查委員 | 審查意見 | 回應 |
|-------|---|---|
| 周榮華教授 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究採用示蹤氣體推估浮力通風之通風量，其結果與採樣位置及頻率有關，請於詳述本項試驗之內容及結果。 2. 通風的模式建立分別採用建研所及中央大學之風洞實驗室之試驗資料，其風場條件並不一致，其分析數據如何區隔？ | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究有測試過示蹤氣體採樣位置及頻率對量測得之通風量的影響，細節會加到報告中。 2. 比較結果時，採用相同之建築模型，風場條件皆設定為薄邊界層流之流況，故數據可比較。 |
| 張正興教授 | <ol style="list-style-type: none"> 1. TAIVENT 2.0 同時考慮熱浮力和風壓通風對於建築物自然通風之影響，並配合台灣各地氣象資料，將可提供建築師和設計者很好使用工具。 2. 建議能長期持續增加 TAIVENT 的功能，並透過實例計算加強驗證工作。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝張教授肯定。 2. 未來的研究會增加模式 TAIVENT 各種實例的計算與驗證。 |
| 陳正平技師 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案對於建築之節能減碳設計有所助益，建議研究目標增加建築內部有熱源之工廠熱浮力通風設計準則。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 工廠內部有熱源之通風設計屬於機械通風的部份，已有勞工安全衛生法規之規定，不屬於本研究之範疇。 |

| 審查委員 | 審查意見 | 回應 |
|-------|--|---|
| 邱英浩教授 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 請於報告中將示蹤氣體的使用細節詳述。 2. 建議可補充熱浮力通風模型的漏氣量測試內容，以供後續研究參考。 3. 由於台灣熱濕氣候的特性，部分時段室內溫度會比室外要來得高，建議未來可考量此類自然通風的現象及利用。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 會將示蹤氣體採樣法之相關細節加到報告書。 2. 實驗前有測試過模型的漏氣量。 3. 室內外溫差造成的熱浮力通風便是本研究所探討之議題。 |
| 謝俊民教授 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本通風計算模式有無樓高使用限制？請將模式運算相關限制寫入報告書或使用手冊。 2. 樓高與風速剖面的影響是否納入 TAIVENT 計算考量？ 3. 圖 5.4 程式介面之指北示意圖例不易了解，請修正。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究所發展的通風模式無樓高之限制。模式運算相關限制會寫入報告書中。 2. TAIVENT 模式有考慮樓高與風速剖面的影響。 3. 會修正圖 5.4 程式介面之示意圖及其說明。 |
| 陳所長瑞鈴 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 本模式未來可加入開口方向、多寡、大小等變因，增加 TAIVENT 模式之應用性。 2. 第40頁中有關溫濕度之圖表是否有誤？請檢查。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. TAIVENT 模式可計算不同的開口大小、位置等變因。 2. 簡報檔中溫濕度之圖表有誤，已修改。 |

參考書目

1. 江哲銘 (1997) 《建築物理》，三民書局印行，台北市，p.89-94。
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. 江哲銘、賴榮平 (2000) 建築通風性能式規範之研究，內政部建築研究所研究計畫報告。
5. 江哲銘、陳念祖、蘇慧貞、鄭懋雄、李彥頤、邵文政、周伯丞 (2001) 辦公空間通風效果與污染物濃度之研究-以台灣商業辦公大樓為例，中華民國建築學會第十三屆建築研究成果發表會論文集，高雄，台灣。
6. 廖崇文 (2003) 不同空調通風路徑對室內空氣與溫熱環境影響之研究，樹德科技大學應用設計研究所碩士論文。
7. 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。
8. 朱佳仁 (2006) 《風工程概論》，科技圖書出版公司印行，台北市，p.204-206。
9. 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。
10. 秦子傑 (2006) 垂直通風管對室內通風效益研究，國立台北科技大學建築與都市設計研究所碩士論文。
11. 黃國倉 (2006) 辦公建築生命週期節能與二氧化碳減量評估之研究，國立成功大學建築研究所博士論文。
12. 何明錦、鍾基強 (2007) 提升室內空氣品質之空調風口配置設計基準計畫，內政部建築研究所委託研究報告。
13. 陳念祖 (2007) 建築開口部裝設導風板對自然通風之效益，國立成功大學建築研究所博士論文。
14. 陳念祖、江哲銘、周伯丞、林沂品、陳正玲 (2007) 居室開口部裝設垂直導風板對室內自然通風之影響，建築學報，Vol. 61: 63-78。
15. 劉佩君 (2007) 中庭建築浮力通風評估之研究—以計算流體力學(CFD)及縮尺空

- 氣模型為例，國立成功大學建築研究所碩士論文。
16. 陳彥志 (2008) 室外風場對風壓通風影響之實驗研究，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
 17. 林憲德 (2009) 《人居熱環境》，詹氏書局印行，台北市，p.72-73。
 18. 朱佳仁，邱英浩，陳彥志，王宇文 (2009) 建築物開口對風壓通風影響之研究，建築學報，Vol. 69: 17-33。
 19. 簡君翰 (2009) 無動力太陽能通風塔能源效益解析－以綠色魔法學校國際會議廳為例，國立成功大學建築研究所碩士論文。
 20. 陳仁浩 (2010) 建築物內部走廊通風之實驗研究，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
 21. 吳玉婷 (2010) 太陽熱能煙囪之自然通風效益解析－以綠色魔法學校展覽室為例，國立成功大學建築研究所碩士論文。
 22. 黃俊傑 (2010) 兩連接房間之浮力通風機制研究及應用浮力通風設計於實體建築環境，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文。
 23. 陳瑞鈴、朱佳仁 (2010) 台灣地區建築物室內自然通風模式之建立研究，內政部建築研究所研究計畫報告。
 24. 朱佳仁，王宇文，陳瑞鈴，黎益肇，劉文欽 (2011) 多區間建築物風壓通風計算模式，建築學報，Vol.76: .
 25. Allard F., and Santamouris M., Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook, James and James Ltd.; 1998.
 26. Allocca C., Chen, Q., Glicksman LR. Design analysis of single-sided natural ventilation, Energy and Buildings 2003, Vol. 35 (8): 785-795.
 27. Alvin C.K., Lai K., Wang F.Z., Chen Q. Experimental and numerical study on particle distribution in a two-zone chamber. Atmospheric Environment, 2008, Vol.42: 1717-1726.
 28. ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE); 2001.
 29. Awbi H.B. Ventilation of Buildings, 2nd ed., Taylor and Francis; 2003, p.522.
 30. Aynsley R.M, Melbourn W. and Vickery B.J. Architectural Aerodynamics, Applied Science Publishers; 1997.
 31. Aynsley R.M. Unresolved issues in natural ventilation for thermal comfort.

- Architectural Aerodynamics, Proceedings of HybVent Forum'99 First International Forum on Natural and Hybrid Ventilation, Sydney, Australia, pp.36-44.
32. Brown W.G. and Solvason K.R. Natural convection heat transfer through rectangular openings in partitions. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1962, 5: 859-878.
 33. Bu Z., Kato S., Takahashi T., Nakao K. Wind tunnel investigation of wind-driven natural ventilation performances in residential basement with attached areaway space. *APCWE-7 Conference Symposium*, Taipei, 2009.
 34. Chang W.R. Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building. *Building and Environment*, 2006, Vol. 41: 549-556.
 35. Chang, T.J., Huang, M.Y., Wu, Y.T. and Liao C.M. Quantitative prediction of traffic pollutant transmission into buildings. *J. of Environ. Science and Health*, 2003, A38, 1025-1040.
 36. Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 2009, Vol.44: 848-858.
 37. Chiu Y.H., Etheridge, D.W. External flow effects on the discharge coefficients of two types of ventilation opening, *J. Wind Eng. and Industr. Aerodyn.*, 2007; Vol. 95: 225-252.
 38. Chu C.R., Chiu Y.-H., Chen Y.-J., Wang Y.-W., Chou C.P., Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross ventilation. *Building and Environment*, 2009, Vol. 44: 2064-2072.
 39. Chu C.R., Chiu Y.-H., Wang Y.-W. An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings. *Energy and Buildings*, 2010, Vol. 42: 667-673.
 40. Chu C.R. and Wang Y.-W. The loss factors of building openings for wind-driven ventilation. *Building and Environment*, 2010, Vol. 45 (10): 2273-2279.
 41. Chu, C.R., Chen, R.-H. and Chen, J.-W. A laboratory experiment of shear-induced ventilation. *Energy and Buildings*, 2011, 43 (10): 2631-2637.
 42. Dascalaki E., Santamouris M. Bruant M, Balaras CA, Bossaer A, Ducarme D, Wouters P. Modeling large openings with COMIS. *Energy and Buildings*, 1999; Vol. 30: 105-115.
 43. Etheridge D.W. and Sandberg M. *Building Ventilation: Theory and Measurement*, John Wiley and Sons, 1996, p.724.
 44. Evola G. and Popov V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 2006, Vol. 38 (5): 491-501.
 45. Feustel H.E. COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport

- model. *Energy and Buildings*, 1999, Vol. 30: 3-18.
46. Gao N.P., Niu J.L., Perino M., Heiselberg P. The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: Tracer gas simulation. *Building and Environment*, 2008, Vol.43: 1805-1817.
 47. Gladstone C. and Woods A.W. On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor. *J. Fluid Mech.*, 2001, Vol.441, 293-314.
 48. Gratia E., Bruyere I. and De Herde A., How to use natural ventilation to cool narrow buildings. *Building and Environment*, 2004, Vol.39, 1157-1170.
 49. Haghghat F., Li Y., Megri A.C. Development and validation of a zonal model – POMA. *Building and Environment*, 2001, Vol. 36: 1039-1047.
 50. Heiselberg P. and Sandberg M. Evaluation of discharge coefficients for window openings in wind driven natural ventilation. *Int. J. of Ventilation*, 2006, Vol. 5 (1): 43-52.
 51. Heiselberg P., Bjorn E., Nielsen P.V. Characteristics of air flow from open windows. *Building and Environment*, 2001, Vol. 36: 859-869.
 52. Hu C-H, Ohba M., Yoshie R. CFD modeling of unsteady cross ventilation flows using LES. *J. Wind Eng. and Industr. Aerodyn.*, 2008, Vol. 96: 1692-1706.
 53. Hunt G.R. and Linden P.F. The fluid mechanics of natural ventilation - displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. *Building and Environment*, 1999, Vol. 34 (6): 707-720.
 54. Hunt G.R. and Linden P.F. Steady state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind. *J. Fluid Mech.*, 2001, Vol. 426: 355-386.
 55. Hunt G.R. and Linden P.F. Displacement and mixing ventilation by opposing wind and buoyancy. *J. Fluid Mech.*, 2004, Vol. 527: 27-55.
 56. Jiang Y., Alexander D., Jenkins R., Arthur H., Chen Q. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large eddy simulation. *J. Wind Eng. and Industr. Aerodyn.*, 2003, Vol. 91: 331-353.
 57. Launder B.E. and Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974; 269-289.
 58. Li, Y. Delsante, A., Chen, Z., Sandberg, M., Andersen, A., Bjerre, M., Heiselberg, P. Some examples of solution multiplicity in natural ventilation. *Building and Environment*, 2001, Vol. 36 (7): 851-858.
 59. Lin, Y.J.P. and Linden, P.F. Buoyancy-driven ventilation between two chambers. *J. of Fluid Mech.* 2002, Vol. 463, 293-312.

60. Linden P.F. and Simpson, J.E. Buoyancy driven flow through an open door. *Air Infiltration Review*, 1985, 6: 4-5.
61. Linden P.F. The Fluid Mechanics of Natural Ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, Vol. 31: 201-238.
62. Liu, P.-C. Lin, H.-T. Chou, J.-H. Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model. *Building and Environment*, 2009, Vol. 44 (9): 1970-1979.
63. Livermore, S.R. and Woods, A.W. Natural ventilation of a building with heating at multiple levels. *Building and Environment*, 2007, Vol. 42: 1417-1430.
64. Melaragno, M. *Wind in Architectural and Environmental Design*, Vn Nostrand Reinhold Co. 1982.
65. Karava P., Stathopoulos T., Athienitis A.K. Wind driven flow through openings – A review of discharge coefficients. *Int. J. of Ventilation*, 2004, Vol. 3 (3): 255-266.
66. Karava P., Stathopoulos T., Athienitis A.K. Impact of internal pressure coefficients on wind-driven ventilation analysis. *Int. J. of Ventilation*, 2006; Vol. 5 (1): 53-66.
67. Karava P., Stathopoulos T., Athienitis AK. Wind induced natural ventilation analysis. *Solar Energy*, 2007, Vol. 81: 20-30.
68. Kurabuchi T., Ohba M., Endo T., Akamine Y., Nakayama F. Local dynamic similarity model of cross-ventilation, Part 1: Theoretical framework, *Int. J. of Ventilation* 2004, Vol.2 (4): 371-382.
69. Kurabuchi T., Akamine Y., Ohba M., Endo T., Goto T., Kamata M. A study on the effects of porosity on discharge coefficient in cross-ventilated buildings based on wind tunnel experiment, *Int. J. of Ventilation*, 2006, Vol.5 (1): 67-78.
70. Mochida A., Yoshino H, Takeda T, Kakegawa T, Miyauchi S. Methods for controlling airflow in and around a building under cross ventilation to improve indoor thermal comfort, *J. Wind Eng. and Industr. Aerodyn.* 2005, Vol. 93: 437-449.
71. Ohba M., Irie K, Kurabuchi T. Study on airflow characteristics inside and outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments. *J. Wind Eng. and Industr. Aerodyn.* , 2001, Vol. 89: 1513-1524.
72. Ohba M., Kurabuchi T., Endo T., Akamine Y., Kamata M., Kurahashi A. Local dynamic similarity model of cross- ventilation, Part 2: Application of local dynamic model. *Int. J. of Ventilation*, 2004, Vol. 2 (4): 383-393.
73. Ren Z. and Stewart J. Simulating air flow and temperature distribution inside

- buildings using a modified version of COMIS with sub-zonal divisions. *Energy and Buildings*, 2003, Vol. 35: 257-271.
74. Roulet C.-A. *Ventilation and Airflow in Buildings*, Earthscan; 2008, p.39-42.
 75. Santamouris M. and Wouters P. *Building Ventilation: The state of the art*, Earthscan; 2006.
 76. Sawachi T., Narita K., Kiyota N., Seto H., Nishizawa S., Ishikawa Y. Wind pressure and air flow in a full-scale building model under cross ventilation, *Int. J. of Ventilation*. 2004, Vol.2 (4): 343-357.
 77. Sherman, M.H. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 1990, Vol. 25: 365-347.
 78. Simiu, E. and Scanlan, R.H. *Wind Effects on Structure: Fundamentals and Applications to Design*, 3rd Edition, 1996 John Wiley Inc.
 79. Tan, G. and Glicksman L.R. Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction. *Energy and Buildings*, 2005, Vol. 37: 1049-1057.
 80. Tung, C., Shih, Y.C., Hu S.C, Chang Y.L. Experimental performance investigation of ventilation schemes in a private bathroom. *Building and Environment*, 2010, Vol. 45, (1): 243-251.
 81. Van Buggenhout, S., Van Brecht, A., Eren Ozcan, S., Vranken E., Van Malcot, W., Berckmans, D. Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces. *Biosystems Engineering*, 2009, Vol. 104: 216-223.

熱浮力效應對建築物室內通風影響之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳瑞鈴、朱佳仁、劉文欽、黎益肇

出版年月：100 年 12 月

版次：第一版

ISBN：978-986-03-0271-4（平裝）