

建築物自然通風量計算評估手冊之研擬期末報告

內政部建築研究所協同研究報告

109 年度

建築物自然通風量計算評估手冊 之研擬

(期末報告)

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

建築物自然通風量計算評估手冊 之研擬 (期末報告)

- 研究主持人 : 王榮進
協同主持人 : 朱佳仁
研究員 : 郭建源、張淇喻、林元智、林禹安
研究助理 : 楊凱傑、江彥葶
研究期程 : 中華民國 109 年 3 月至 109 年 12 月
研究經費 : 新臺幣捌拾參萬壹仟參佰元

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

目次	V
圖次	IX
表次	XIII
摘要	XV
第一章 緒論	1
第一節 前言	1
第二節 研究動機	5
第三節 文獻回顧	7
第四節 計畫內容和方法	16
第二章 通風模式	19
第一節 大氣邊界層流	19
第二節 台灣六都的風場	20
第三節 單區間通風模式	26
第四節 不同風向之貫流通風	31
第五節 多區塊貫流通風模式	34
第六節 多區塊多開口模式	36

第七節 通風量計算步驟	38
第三章 自然通風潛勢	45
第一節 建築物的熱平衡	45
第二節 自然通風之節能效率	50
第三節 自然通風節能效率	55
第四章 自然通風計算示範案例	58
第一節 室內無隔間貫流通風	58
第二節 不同風向之風壓通風示範例	64
第三節 單側雙開口之示範例	68
第四節 三側三開口風壓通風示範例	69
第五節 廠房之貫流通風示範例	73
第六節 住宅之風壓通風示範例	75
第七節 浮力通風示範案例	82
第八節 辦公空間之風壓通風示範例	85
第九節 中小學教室之風壓通風示範例	88
第十節 宿舍風壓通風示範例	89
第五章 結論與建議	93
第一節 結論	93

第二節 建議	95
附錄一 期初審查意見表	97
附錄二 第一次專家座談會審查意見表	101
附錄三 期中審查意見表	107
附錄四 第二次專家座談會審查意見表	113
附錄五 期末審查意見表	117
附錄六 自然通風量計算評估手冊(初稿).....	121
參考文獻	216

圖次

圖 1- 1 自然通風和機械通風之示意圖	3
圖 1-2 各類建築物耗能設備平均用電量之比例	4
圖 1-3 建築物自然通風量之應用	6
圖 1-4 研究流程圖	7
圖 2-1 不同地況之平均風速剖面.....	19
圖 2-2 台北市全年的風花圖(2000-2008)	22
圖 2-3 新北市全年的風花圖(2000 - 2008).....	22
圖 2-4 桃園市全年的風花圖(2018)	23
圖 2-5 台中市全年的風花圖(2000-2008)	23
圖 2-6 台南市全年的風花圖(2000-2008).....	24
圖 2-7 高雄市全年的風花圖(2000-2008)	24
圖 2-8 台北各區全年的風花圖(2000-2008).....	25
圖 2-9 台北氣象站各季的風花圖(2000-2008).....	25
圖 2-10 單區間雙開口貫流通風之示意圖	28
圖 2-11 單區間雙開口貫流通風之示意圖	29
圖 2-12 單區間多開口建築物之示意圖	30
圖 2-13 不同風向角之風壓通風量	31
圖 2-14 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖.....	32

圖 2-15 雙側雙開口及單側單開口的剪力通風量.....	33
圖 2-16 有室內隔間雙開口建築物通風之示意圖.....	33
圖 2-17 室內隔間對雙開口建築物通風量之影響.....	34
圖 2-18 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖.....	35
圖 2-19 建築物有室內隔間風壓通風之示意圖.....	38
圖 2-20 建築物外推式陽台對落地窗風壓通風影響之示意圖..	40
圖 2-21 建築物外推式陽台中心平面上的風速向量圖.....	40
圖 2-22 相鄰建築物影響下風建築物風壓通風之示意圖.....	41
圖 2-23 相鄰建築物遮蔽效應之折減係數	42
圖 2-24 建築物自然通風計算之流程圖	44
圖 3- 1 案例 1 和案例 2 的室內降溫效果比較圖	47
圖 3-2 案例 2 和案例 3 的室內降溫效果比較圖.....	47
圖 3-3 臨窗通風面積與對流通風面積之示意圖.....	52
圖 3-4 對流通風路徑的轉角角度之和必須小於 90 之示意圖..	53
圖 3-5 建築物常見之內部隔間平面圖	54
圖 4-1 對側開口貫流通風之示意圖.....	59
圖 4-2 外推窗與牆面夾角之示意圖	61
圖 4-3 建築物縱深對貫流通風之影響	62
圖 4-4 貫流通風量隨建築物縱深之變化圖.....	63

圖 4- 5 不同風向下建築物風壓通風之示意圖	65
圖 4-6 建築物的開口與風向的夾角之示意圖.....	66
圖 4-7 風向平行於建築物開口之風壓通風.....	67
圖 4-8 單側雙開口建築物之風壓通風.....	69
圖 4-9 三側三開口建築物(A)室內隔間及開口位置之示意圖；(B) CFD 模擬之室內外風速向量圖	71
圖 4-10 三側三開口建築物之風壓通風量	72
圖 4-11 單區間多開口廠房風壓通風之示意圖.....	73
圖 4-12 住宅室內隔間之示意圖.....	76
圖 4-13 住宅案例 9-1 之風壓通風量和風速向量圖.....	77
圖 4-14 住宅之風壓通風(A)案例 9-1；(B)案例 9-2；(C)案例 9-3； (D)案例 9-4	79
圖 4-15 透天式建築浮力通風之示意圖	84
圖 4-16 辦公空間平面圖	85
圖 4-17 辦公空間各區的通風量(A)風向由北向南；(B)風向由西 向東.....	87
圖 4-18 中小學教室風壓通風之示意圖.....	89
圖 4-19 宿舍風壓通風之示意圖(A)風向正對開口；(B)風向平行 於開口.....	90

圖 4-20 (A)自然通風量 Q 與 VP 之關係；(B)換氣率 ACH 與 VP 之
關係..... 91

表次

表 1-1 各種建築空間單位樓地板面積最小通風量	2
表 2-1 不同地況的邊界層高度與指數	20
表 2-2 台灣六都的平均風速與盛行風向	21
表 2-3 紗網窗、百葉窗、外推窗之流量係數	26
表 2-4 紗網窗、百葉窗、外推窗之折減係數	39
表 3- 1 自然通風降溫案例之參數	46
表 4-1 不同樓層之貫流通風量	60
表 4-2 不同開口裝置之貫流通風量	60
表 4-3 不同長度建築物的貫流通風量	63
表 4-4 不同風向角之雙側雙開口通風量	65
表 4-5 風向平行於建築物開口之通風量	66
表 4-6 不同風向下單側雙開口室內無隔間之通風量	67
表 4-7 單側雙開口室內有隔間不同風向之風壓通風量	68
表 4-8 案例 6 的風壓通風量	72
表 4-9 廠房之風壓通風量	74
表 4-10 案例 9-1 各房間的通風量(貫流通風)	79
表 4-11 案例 9-2 各房間的通風量(風切通風)	80
表 4-12 案例 9-3 各房間的通風量(單側通風)	80

表 4-13 案例 9-4 各房間的通風量(折減效應)	81
表 4-14 案例 10 的重要參數及通風量	83
表 4-15 辦公室案例各區間的通風量	86

摘要

關鍵詞：建築物通風、自然通風、通風量模式、建築節能、設計手冊

一、研究緣起

建築物的通風目的在於提供居住者所需的新鮮空氣、降低室內溫度與污染物濃度，達到舒適的室內環境。台灣夏季濕熱的氣候狀況，使得許多建築物不分日夜地使用冷氣空調來維持建築物室內環境的舒適性，而耗損大量的電力，使得夏季的用電需求決定全台灣發電設施的裝置容量。若能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，將可達到建築節能之目的。本此外，希望能透過此自然通風手冊，讓建築物使用者瞭解自然通風的原理與操作方式，自行開關建築物的門窗，有效地利用自然通風，達到建築節目的目的。

二、研究方法及過程

計畫整理建築物自然通風的相關研究和計算模式，發展一個適用於台灣氣候條件和建築特性的自然通風計算模式，並藉由不同的建築案例有系統地說明室外風速、風向、開口面積、位置及阻礙通風之因素對建築物自然通風的影響，編寫一本自然通風設計計算手冊。祈期國內建築師能可使用此模式來計算一般建築物的自然通風量，並設計出可以利用台灣氣候條件，舒適又節能的建築物。

三、重要發現

研究成果並發現綠建築評估手冊中的建築物自然通風潛力VP只計算建築物的開窗面積，並未考慮室外風速、風向、室內隔間對自然通風量的影響，因此計算得之VP值無法真實反映建築物的自然通風狀況。

四、主要建議事項

建議一：

利用公家機關的建築用電資料研究建築物的自然通風潛力及節能效果：立即可行建議

主辦機關：社團法人中華民國風工程學會、內政部建築研究所

協辦機關：交通部中央氣象局、北投公立圖書館

收集新店區內政部建築研究所、北投公立圖書館一整年的建築平面圖、用電量、室內外氣溫、冷氣使用時間及使用自然通風的時段等資料等，利用綠建築評估手冊(2019)所建議之公式計算各棟建築物的自然通風潛力 VP 與空調節能效果 Vac，和實

際觀測值比較，以了解 VP 與 Vac 值的正確性。再使用建築能源模擬模式 EnergyPlus、eQuest 等軟體研究採用自然通風的運作模式和節能效果。探討如何落實自然通風於國內的辦公大樓與各級學校，並將其成果提供建築師、冷凍空調技師、政府機關、各級學校、商辦大樓之參考。

建議二：

修訂建築物自然通風潛力之評估方式：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國全國建築師公會、社團法人中華民國風工程學會

內政部建築研所 2019 年出版的「綠建築評估手冊 基本型」的附錄三「建築物採光通風效益與空調節能率評估原則」與內政部營建署於民國 108 年 12 月頒佈之「建築物節約能源設計技術規範」的附錄三「建築物自然通風空調節能評估」有建築物自然通風潛力 VP 及空調節能效益 Vac 之計算式，但沒有計算自然通風量之方法。且計算自然通風潛力 VP 之公式需要單側窗與對流窗之面積，但單側窗與對流窗的定義不夠清楚，易產生爭議。建議未來修訂「綠建築評估手冊」與「建築物節約能源設計技術規範」時，可加上建築物自然通風量之計算方法。

基本名詞定義

開口：建築物外牆及內部可以讓空氣自由流動的開孔或縫隙，譬如門、窗和抽風機的通風口等，本手冊僅計算開口斷面積大於 0.1 m^2 的開口。

開口面積：實際氣流可以通過的斷面面積。譬如橫拉窗的開口面積需要扣除玻璃遮蔽之面積，因此橫拉窗的最大開口面積為窗戶總面積的50%。

開口率：建築物外牆上總開口面積與外牆面積之比率。完全密閉之建築物，開口率為0；無牆的涼亭的開口率為1.0。

對流開口：建築物外牆及內牆上的門及窗，氣流可由一個開口自由地流經另一個開口而流出該區塊。同一戶住宅內部的各房間的門或窗可視為對流開口，譬如廚房連通到居室及陽台之門窗為對流開口。經常關閉之門扉與自動門不屬於對流開口，如由私人空間(如住宅內部)到公共空間(如樓梯間)之間的門便不屬於對流開口。

單側開口：建築物內部的區塊只有一個對內的開口或只有一個在外牆上的開口，空氣在該開口有進有出，可將一段時間之後的平均換氣率做為其通風量。

室外風速：在建築物外部不受其他建築物干擾之風速，靠近地表之風速會隨高度而變，故計算風壓通風時必須換算開口高度處之室外風速，常用單位為[m/s]。

外牆風壓：室外風速施予建築物外牆上的時間平均風壓力，與風速、風向、建築物外形有密切的關係，與建築物構造(磚造、混凝土、木構造)無關。公制常用單位為 $[\text{N}/\text{m}^2]$ 或 $[\text{kgf}/\text{m}^2]$ 。

室內氣壓：當建築物外牆有開口且建築物外部受到風力作用時，會造成室內空氣壓力偏離室外的大氣壓力。當室外風速為零時，室內氣壓等於室外的大氣壓力(亦即相對壓力為零)。

流量係數：計算氣流通過開口通風量之無因次係數，其值介於0 ~ 1.0，與開口是否有裝設紗窗、百葉窗、外推窗有關，與風速、風向、開口面積無關。

風壓係數：外牆風壓除以空氣密度和室外風速平方得之無因次風壓，可由風洞之建築模型實驗量測得。一般而言，建築物迎風面外牆的風壓係數為正值(高於大氣壓力)；背風面外牆為負值(低於大氣壓力)。譬如，矩形建築物迎風面的風壓係數介於0.5~0.9；背風面外牆風壓係數介於-0.60 ~ -0.10，隨建築物高度、寬度而變。

有效開口面積 A^* ：貫流通風發生時，由迎風面、背風面開口面積、流量係數合起來計算得之有實質效益的通風面積。

盛行風向：又稱為「常時風向」，在建築基地發生機率最大的風向，以正北為零。

風向角：又稱為「風攻角」，室外風向與建築物迎風面外牆上開口之間的角度。當風向垂直於外牆開口時，風向為零；當風向平行於開口時，風向為 90。

風壓通風：又稱為「風力通風」，利用自然風力作用在建築上所造成的風壓差異，推動氣流流動而產生室內外空氣之交換。

風切通風：當室外風向平行於開口，在開口處的風切紊流造成的室內外空氣交換。

貫流通風：當建築物迎風面和背風面(或側面)皆有通風開口，兩開口的壓力差異推動空氣由迎風面的開口流入，由背風面的開口流出所形成之通風。

單側通風：建築物僅在同一側的牆面上有開口，室內外的壓力差異或風切紊流所造成的通風。

浮力通風：當一棟建築物內部有垂向的溫度差異，且在外牆高處和低處皆有開口，則室內的熱空氣會由高處的開口流出，而室外的冷空氣會由低處開口流入補充，利用空氣的熱浮力地將熱空氣排出，並促使室內外的空氣上下對流。

通風量 Q ：單位時間之內流經單一開口的空氣體積流量，常用單位為每秒立方公尺 [m^3/s]。

總通風量 ΣQ ：建築物之內某個區塊(房間)之內，經由不同開口，所有流入此區塊的空氣流量(不計流出)。譬如一個房間有四個開口，兩個開口在迎風面，一個在側面，另一個在背風面，則總通風量為流經迎風面兩個開口風量之總和。

小時換氣率(ACH)：一小時之內，室內空氣被置換的次數。其計算公式為流經該區塊的總通風量除以該區塊內部的體積，單位為每小時[1/hr]。

平均換氣率：一棟建築物之內，各區塊之內小時換氣率之算數平均值。

滲隙風：由門縫、窗戶縫隙流入或流出建築物的通風量，在一般的大氣狀況下，流經門縫、窗縫的通風量遠小於門窗全開之通風量，本手冊不計算其通風效果。

機械通風：又稱為「強制通風」，利用風扇、抽風機或送風機促使空氣交換和流動，譬如冷氣。一般家庭廚房的抽油煙機及廁所的抽風機，屬於局部機械通風，對建築物整體的自然通風影響很小，本研究忽略不計。

第一章 緒論

第一節 前言

建築通風主要的目的是提供建築物使用者所需的新鮮空氣、調節室內氣溫與排除室內空氣中的污染物或濕氣，達到健康和舒適的室內環境。台灣夏季濕熱的氣候狀況，使得許多建築物不分日夜地使用冷氣空調，僅為維持室內氣溫在一個舒適的狀態，但需要耗費大量的電力。台灣的春、秋、冬三季的氣候狀況，則適用自然通風，打開建築物外牆上的門窗，即可達到建築物所需的換氣需求。表 1 為台灣內政部營建署 108 年頒訂之「建築技術規則建築設備編」第二節機械通風系統所訂定之各種用途建築空間設置機械通風設備的最小通風量規定。以一般住宅的起居室、臥室、私人辦公室為例，單位樓地板面積最小通風 $8.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，藉由自然界的風力驅動，很容易就達到此通風量。亦即一般住宅的起居室、臥房，除了氣候炎熱需要使用冷氣降溫，平時使用自然通風便有足夠的換氣率，不需要使用機械通風。其他用途之建築空間則視其用途、樓地板面積大小、是否有對外開口、開口面積等因素而定。因為使用的目的不同，有不同的通風需求。因此建築師必須依據建築物的使用特性、當地的氣候、風速、風向條件，來設計建築物的自然通風量和機械通風量，讓住戶依氣候狀況選擇使用。

許多國家皆針對不同的建築物用途訂定通風量的標準，譬如美國環保署(US EPA)室內空氣品質規範(Building Air Quality, 1998)建議若不使用機械通風的狀況下，住宅之最低的小時換氣率(Air change per hour, ACH)須維持在 0.35 hr^{-1} 以上。小時換氣率(ACH)的定義為：

$$\text{ACH} = \frac{Q}{V} \quad (1-1)$$

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 $[\text{L}^3/\text{T}]$ 。換氣率 ACH 的單位為 $[\text{1}/\text{hour}]$ 。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，污染物愈不易在室內蓄積。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 $5 \text{ liter}/\text{sec}$ ，主臥室的通風量 $10 \text{ liter}/\text{sec}$ ，小時換氣率 ACH 必須維持 0.3 hr^{-1} 以上。日本工業標準(JIS, 2003)建議：住宅換氣率必須達到 0.5 hr^{-1} ，非住宅換氣率必須達到 0.3 hr^{-1} 。

表 1-1 各種建築空間單位樓地板面積最小通風量

房間用途	通風量 (m ³ /hr/m ²)
起居室、臥室、私人辦公室	8
大型辦公室、會客室	10
工友室、警衛室、收發室、詢問室	12
會議廳、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	20
營業用餐廳、咖啡廳、酒吧	25
戲院、電影院、演藝場、集會堂之觀眾席	75
營業用廚房	60
非營業用廚房	35
衣帽間、更衣室、盥洗室、樓地板面積大於15 m ² 發電或配電室	10
茶水間	15
住宅內的浴室、廁所	20
公共浴室、廁所及可能散發有害氣體之工廠	30
汽車庫	25

資料來源：內政部營建署建築技術規則建築設備編

建築物可採用自然通風(Natural ventilation)與機械通風(Mechanical ventilation)的方式來達到其換氣的需求。自然通風是藉由自然界風力(如圖1-1所示)或室內外的溫度差異驅使空氣流動，可節約能源，但未必能達到足夠或可降低室內氣溫的通風量。機械通風又稱為強制通風，是利用風扇、抽風機或送風機促使空氣交換和流動，可控制通風量，但耗費能源。台灣的許多建築物在夏季，大多使用冷氣空調來維持室內環境

的舒適性，但亦會耗費大量的電力。因此若能有效地利用自然通風(Natural ventilation)，減少冷氣空調的使用，將可達到節能減碳之目的。

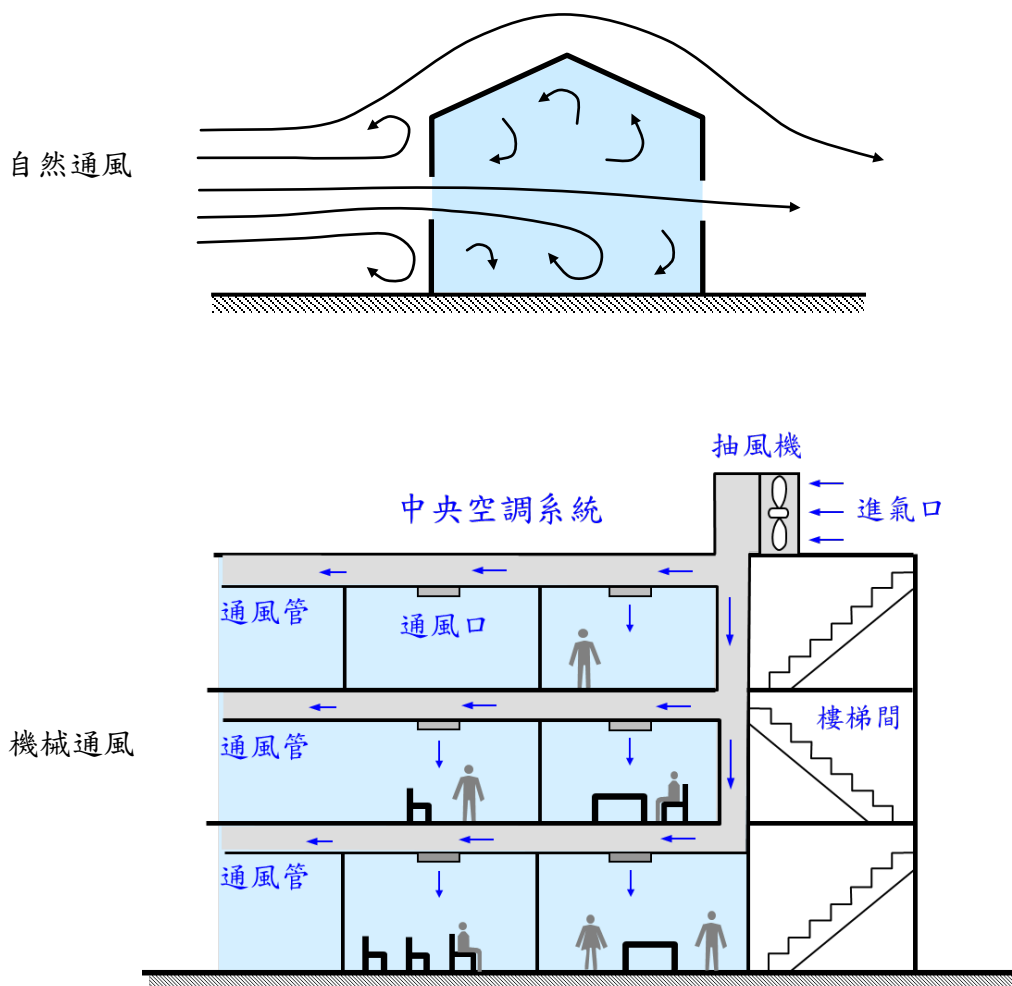


圖 1-1 自然通風和機械通風之示意圖

資料來源：本研究團隊繪製

台灣一直是能源短缺的國家，依據103年全國能源會議之報告，台灣目前有98%的能源需仰賴進口，而其中各類建築物每年所消耗之能源，約佔全國能源比例23%。根據台灣電力公司的資料顯示：台灣夏季用電約為冬季用電的1.4倍，主要就是因為夏季大量使用冷氣空調的緣故。而台電公司發電設備中約有30%的裝置容量是為應付夏季冷氣空調的用電需求。若建築耗能可以藉由自然通風而大幅地下降，將可對都市氣候、社會經濟、國家資源、氣候的變遷、環境的永續發展有深遠的影響。

然而早期興建之建築物當時並無節能法規，故普遍存在耗能及不符生態環境之問題。黃國倉(2006)的研究指出：國內一般辦公大樓空調耗電佔建築能耗比率約為45%，長

期累積所耗費的能源十分可觀。圖 1-2 為辦公大樓與百貨公司建築耗能設備平均用電量之比例，空調耗電佔建築能耗比率超過 50%。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。以一棟 10 層樓辦公大樓為例，若每個層樓地板面積 1000 m²，若每天開空調的時間 8.0 hr，一年便可減少用電 2.8~8.2 億度電。因此建築師應該先計算該建築物的自然通風，當換氣率不足或室內氣溫可能不舒適時，才採用機械通風。

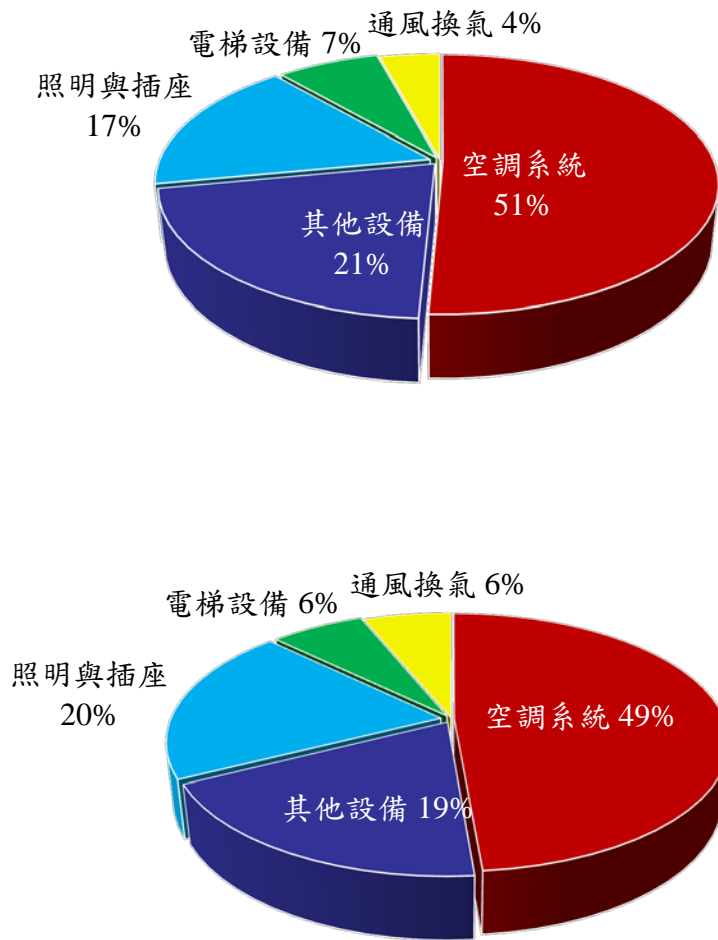


圖 1-2 各類建築物耗能設備平均用電量之比例
資料來源：非生產性質行業能源查核年報(2019)

自然通風可依照其驅動力分為風壓通風和浮力通風兩種方式。以下分述之：

- (1)風壓通風：利用自然風力作用在建築上所造成的風壓差異，推動氣流流動而產生室內外空氣之交換。當建築物迎風面和背風面皆有通風開口(門窗)，則迎風面的開口為進風口，而背風面的開口為出風口，形成貫流通風(Cross ventilation)，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(One-side ventilation)，亦可造成自然通風，但通風效果較差(Chu et al., 2011)。當室外風速超過 1.5 m/s 時，風力即可促成自然之換氣(江哲銘, 1997)。
- (2)熱浮力通風：當一棟建築物高處、低處皆有對外的開口，且室內外有溫度差異，則室內的熱空氣會由高處的開口流出，而室外的冷空氣會由低處開口流入補充，利用熱浮力自然地將熱空氣排出室內，並促使室內外的空氣交換。

自然通風乃是利用自然界的風力和溫度差異驅使建築物內外空氣的流動和交換，若可達到足夠的換氣量和室內環境的舒適性，便不需使用耗費能源的通風機械。但自然通風受到許多因素的影響，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的影響。因此建築師在評估建築物的自然通風狀況，需要考量的因素較多。國內的建築物理環境之類的書籍大多以定性地描述自然通風的優點(林憲德 1996; 陳海曙 2011)，並沒有完整地介紹自然通風量的計算方法。本手冊希望能推廣自然通風，讓國內建築師用簡易的方法來計算台灣常見建築物的自然通風量，亦可讓建築物使用者瞭解自然通風的原理與操作方式，自行開關建築物的門窗，有效地利用自然通風，達到建築節能的目的。

第二節 研究動機

台灣建築物理環境的書籍以及大專院校建築系所在教建築物通風時，大多以定性描述的方式解釋自然通風的重要性，並未說明自然通風量的計算方式。因此，台灣的建築師在擬定建築物通風計畫時，大多不會針對該建築物計算其自然通風量，遑論使用計算流體動力學(CFD)數值模式或風洞實驗研究建築物自然通風的最佳策略。針對大型的公共建築物，建築師大多依賴冷凍空調師計算機械通風量，但採用機械通風往往會過度設計，而耗費大量電力。

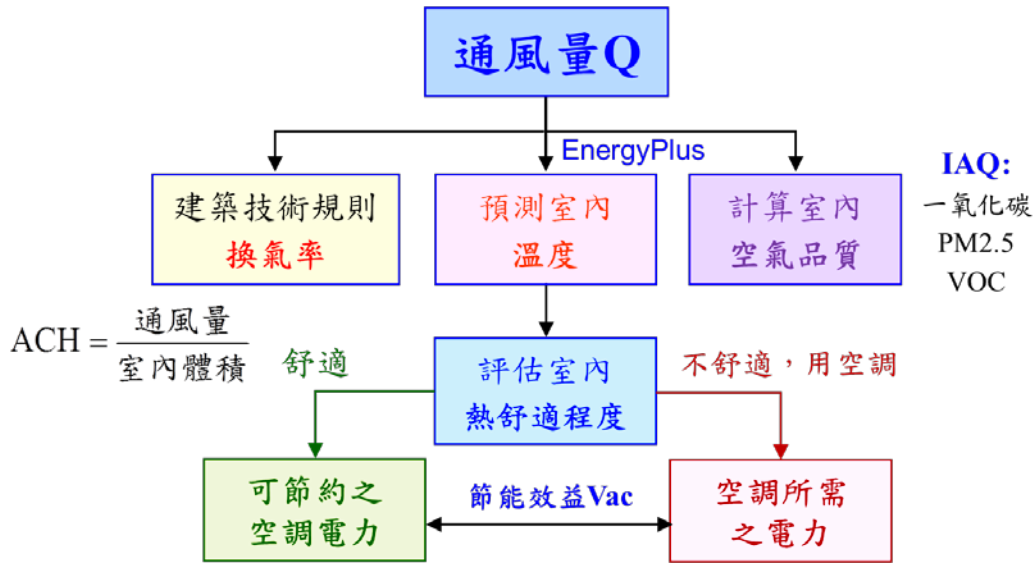


圖 1-3 建築物自然通風量之應用

資料來源：本研究團隊繪製整理

內政部建築研所2015年版的「綠建築評估手冊 - 基本型」的附錄三「建築物採光通風效益與通風空調節能評估規範」有說明自然通風對建築物空調節能效益之計算公式，其內容依據李怡萱 (2014)所建議之自然通風潛力VP的經驗式，但並未提出建築物自然通風量之計算方式。內政部營建署於民國108年12月頒佈之「建築物節約能源設計技術規範」的附錄三「建築物自然通風空調節能評估」以及2019年版的「綠建築評估手冊 - 基本型」修改自然通風潛力VP的計算公式，亦未說明建築物的自然通風量的計算方法，本手冊將補足此缺憾。

圖 1-3 顯示建築物自然通風量之應用，若可針對某一棟建築物，依據當地的平均風速、盛行風向、建築物座向與開口面積預測最可能發生的自然通風量，再利用此自然通風量預估建築物換氣率、室內溫度及污染物濃度之預測。若自然通風已達最大的通風量，室內氣溫依然過高，達到不舒適的狀況，則住戶會開啟冷氣空調，可由使用冷氣的時間估算所耗的電力。若藉由自然通風，室內氣溫可維持在舒適的狀況，便可計算所節約的空調電力。若不知自然通風量，估算之節能效率便失之準確。

本研究擬利用風壓通風與浮力通風的理論與流體質量守恆原理，建構一個計算多區間建築物(Multi-zone)的自然通風與換氣率的物理模式，利用 CFD 模式來驗證物理模式之預測值。然後便可以輸入建築物的外型、開口設計參數、當地的盛行風向、平均風速、溫濕度等氣象資料，便可計算多區間建築的自然通風量或換氣率。並整理自然通風的相關理論，編寫一本的建築物自然通風設計手冊，藉由實際建築物案例來介

紹自然通風量的計算方式，讓建築師和一般民眾了解自然通風量的原理，有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出可利用自然通風之建築物，減少建築物的耗能。並讓建築物使用者瞭解自然通風的操作方式與時機，住戶可依據室內外的氣候狀況，自行開關建築物的門窗，善用自然通風使得室內環境達到舒適又節能的狀態。

本計畫依據自然通風量的原理，有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出可利用自然通風之建築物，減少建築物的耗能。並讓建築物使用者瞭解自然通風的操作方式與時機，住戶可依據室內外的氣候狀況，計畫執行步驟如圖 1-4 所示。

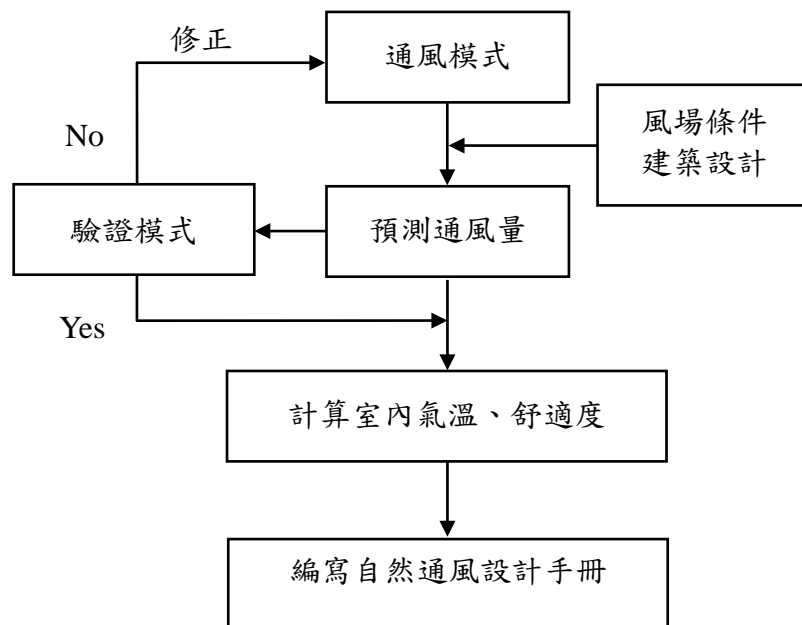


圖 1-4 研究流程圖

資料來源：本研究團隊繪製整理

第三節 文獻回顧

在無空調時代，自然通風廣為所傳統建築所採用，譬如乾燥氣候的中東地區，建築物會使用通風塔來加速室外空氣流入室內，降低室內氣溫；濕熱的東南亞地區的傳統建築則採用干欄式建築，有良好的自然通風及遮陰效果。自1970年代石油危機，歐美國家鑑於能源的短缺，開始研究自然通風來降低建築物的耗能。但歐美等國多半位於溫帶和寒帶，他們的研究大多針對如何減少冬季暖氣的耗能。台灣的傳統建築承

襲廣東、閩南的騎樓式建築，可遮雨及遮陰。而現代的騎樓式店面建築門口大多採用鐵捲門方便開關，再以一個長廊連通前廳與後方的房間，此類建築不利於採光和自然通風，實有檢討之必要性。

因為自然通風是藉由風力或室內外的溫度差異驅使空氣流動，其缺點為通風量不穩定，且未必能達到足夠的通風量，因此自然通風需要深入地研究其降溫效率與適用性。而研究建築物通風和室內外風場的方法包括有：(1)實場監測；(2)區塊模式；(3)計算流體動力學模式；(4)風洞實驗；(5)經驗公式。各有其優缺點(Awbi, 2003; Chen, 2009; Etheridge, 2011)，以下分述之：

(1) 實場監測(Field observation)：

實場監測乃是在一棟真實建築物內部、外部裝設量測風速、溫度、溼度的儀器，在一段時間之內監測其變化，並訪問建築物使用者的感受，以瞭解建築物通風的效果。這是瞭解建築物通風最直接的方式，且實場量測得之數據資料往往最具說服力。但缺點是實際的室外風速、風向、溫度與時俱變，而會影響風建築物通風的因素又太多，不易由監測數據深入瞭解通風現象背後的機制，且某一棟建築物的監測數據無法應用於其他建築物之設計。除此之外，實場量測所需的人力、經費和時間較多。且建築物未興建之前，無法進行監測，故較少建築物採用此法研究其自然通風的狀況。國內的研究如呂博弘等(2006)在實際建築物研究陽台裝設瓦斯熱水器所造成的一氧化碳累積，結果發現在體積約 14 m^3 的全密閉的陽台空間中，一氧化碳濃度值可在15分鐘達到1500 ppm，此濃度會造成人員昏迷或死亡的情形。Gao et al. (2009)利用示蹤氣體(Tracer gas)濃度法量測一棟單側開口的實體建築物的換氣率，並將結果與CFD模擬結果比較。Tung et al. (2010)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。

(2) 風洞實驗(Wind Tunnel Experiment)：

製作某一棟建築物和周遭相鄰建築物的縮尺模型放置於風洞內，研究該建築物在不同室外風速、風向下的風場與通風量。其優點為可以控制風速、風向、開口面積等，採用有系統地探討該建築物的通風現象。且實驗數據較可靠，可以驗證物理模式或計算流體動力學(CFD)模式之預測結果。但缺點為儀器設備較昂貴，只有大學或研究機構才有大型的風洞設備可以進行建築物模型實驗。建築業者為節省經費，往往都會採用此方法。

(3) 多區間模式(Zone model)：

多區間模式又稱為網路模式(Network model)，將建築物內部空間依其隔間分為數個區塊(Zone)，將單一區塊當成一個完全混合(Fully mixed)的控制容積。依據質量守恆定律，在區塊內空氣質量、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。因此計算在一段時間 Δt 之內，流入和流出區塊的物質總量便可得區塊內物質的平均濃度和溫度，譬如CONTAM、COMIS、NatVent、BREEZE等模式(Feustel, 1999; Dascalaki et al., 1999; Ren and Stewart, 2003)。其優點為計算簡單，可計算區塊內穩態下的通風量和濃度。但缺點為無法得知各個區塊內風速、溫度及濃度場的分佈及隨時間的暫態變化。

朱佳仁 等(2011)發展了一個適用於台灣氣候條件的多區間自然通風計算模式TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，模式結合了台灣中央氣象局26個氣象觀測站1961~2008年的氣象資料(平均風速、盛行風向、氣溫、濕度)可計算建築物的風壓通風量和換氣率。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描計量測得之，再使用二維的立方弧線法(Cubic Spline)內插求得建築物表面任意一點的壓力。此外TAIVENT模式利用牛頓-拉福森(Newton-Raphson)法求取各個房間的室內壓力及各開口的通風量，研究結果顯示若建築物表面的風壓係數為已知，可以利用TAIVENT模式計算多區間(Multi-zone)建築物的風壓通風量。但此模式的缺點是當室外風壓差異很小時，通風量亦小，模式迭代過程不易收斂求得通風量。本研究便是簡化多區間通風模式，並結合經驗模式來計算室外風壓差異很小之自然通風量。

(4) 計算流體動力學模式：

計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模式將室內、外空間格網化，依據連續方程式、那維爾-史托克(Navier-Stokes eqn.)方程式和擴散方程式(Diffusion eqn.)，採用數值方法計算流場控制方程式的數值解，配合上適當的邊界和初始條件，求得計算域之內各個格網點上的風速、壓力、溫度和濃度，此法又稱為全域模式(Field model)。其優點為可以計算出流場的細部變化，但缺點為計算量大，模式參數眾多。若計算模式的設定參數、網格、收斂標準不正確，可能會得到似是而非的計算結果，因此必須與相同流況之實驗數據比對以驗證其正確性(Awbi; 2003; Chen, 2009)。

(5) 經驗公式：

由現地監測或實驗室之實驗數據歸納、迴歸分析而得之經驗公式。優點是簡單好用，缺點是學理依據不足，僅適用於與原實驗建築相同之建築物，未必適用於計算不同建築物或不同風向、風速狀況下的結果，正確性較低。譬如李怡萱 (2014)使用CFD模式計算住宅式建築物七種不同室內隔間的風壓通風，分析其通風路徑和面積，區分臨窗通風面積和對流通風面積，提出計算自然通風潛力VP的經驗計算式，但此VP的經驗式並未適用於不同風向或其他類型建築物，如辦公室、教室、宿舍等建築物的自然通風狀況。

近20年來，國內外有許多研究論文採用以上方法探討建築物的自然通風，大多針對某一特定特殊的通風問題、或流場機制進行深入的研究，做學術上的探討。這些論文皆未全面性的介紹自然通風，以下回顧國內外建築物通風的研究文獻：

Dascalaki et al. (1999)比較實場監測與多區間模式COMIS預測之單側通風與貫流通風的通風量，此研究提出了在室內隔間的門窗所使用的流量係數為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。

周伯丞 (2000)針對台灣地區的氣候環境，運用計算流體動力學(CFD)的紊流模式，配合全尺寸建築的實測數據，研究室內風場及換氣量。其研究結果顯示：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。而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。且標準k- ϵ 紊流模式與低雷諾數k- ϵ 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- ϵ 模式所需要的計算時間較短。

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。

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，則流量係數幾乎不變。

Haghighat et al. (2001)提出了一個可以簡易計算房間中風場與溫度分佈的數值模式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。

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。

Allocca et al. (2003)利用k- ϵ 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。

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模式與多區間模式MMPN進行自然通風的預測比較。該研究探討建築物中庭的設計，所模擬的建築物為實體尺寸的大尺度比例。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。

Evola and Popov (2006)利用標準k- ϵ 紊流模式和重整化群(Renormalization Group, RNG) k- ϵ 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：標準k- ϵ 紊流模式的計算結果誤差較大，重整化群(RNG) k- ϵ 模式的結果則較接近實測之通風量。

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。

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時，有助於提升單側通風時之換氣率，並隨導風板深度而遞增。(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，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°~22.5°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。

劉嫻君 (2007)利用標準k- ϵ 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。

王家瑩(2007)使用標準k- ϵ 紊流模式研究自然通風對台灣秋季與夏季之室內熱環境的影響，並提出建築物通風設計的基本原則和方法。模擬結果發顯示：相較於平屋頂無天窗及挑高平屋頂剖面，挑高斜屋頂的剖面形狀有助於風壓通風帶動室內氣流及降低室內平均溫度，有顯著的效果。

楊武泰 等(2008)運用CFD數值模擬研究水平導風板形式搭配排風扇之辦公室空

間內的氣流場、溫度及污染物濃度場之分佈情況，並探討混合式通風應用於深度較長之辦公空間內部的通風環境，以瞭解適合自然通風之時段及採用混合通風系統調控模式之效益。

Chu et al. (2009)依據連續方程式和孔口流量公式推導得一個貫流通風模式，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，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風壓通風量。並利用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，流量係數會隨雷諾數而變。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。

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，通風量愈小。

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，太陽能煙囪在春秋適用性較夏季高，當春秋室外氣溫 26°C 時，其室內溫度介於 $26\sim 27.2^{\circ}\text{C}$ ，室內可產生自然通風風速 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ ，約可等效降溫 $0.5\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ ，符合春秋自然調節空間90%群眾可接受之溫度 $23.5\sim 28.5^{\circ}\text{C}$ ，而夏季外氣溫 30°C 時，室內溫度則只符合80%群眾之可接受溫度。該研究亦發現戶外風速有助於增加太陽能煙囪之通風效益，在相同之室內發散熱設定下，戶外有風比無風狀態的通風量增加約13~22%，換氣次數約增加2.9~3.8次/小時，其中以春秋下午增加最多，夏季上午增加最少。

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. (2010)採用理論分析及風洞模型實驗的方式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噴嘴流量計來量測。實驗結果發現室內開口的流量係數為開口大小的函數，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。

Chu et al. (2011)使用風洞模型實驗與示蹤劑(Tracer gas)濃度衰減法研究風向對無室內隔間之建築物，單側開口及雙側開口的換氣率之影響。實驗結果發現當風向平行於開口時，開口處的风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。且依據實驗結果歸納出：不同風向下，單側開口及雙側開口建築物換氣率的預測方式。

朱佳仁等(2011)發展一個通風模式TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，可用以計算多區間(Multi-zone)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多區間建築物風壓通風的通風量和換氣率。

許皓香 (2013)利用CFD數值模式研究熱浮力通風於高層辦公大樓之應用，其研究結果發現：辦公室所洩漏的冷氣會間接地降低的公共空間的溫度，沿著中庭的扶手可防止冷氣流入中庭，若降低冷氣洩漏位置，搭配天花板高度可驅使建築物進行置換式通風，提升室內舒適度。

黃瑞隆 (2013)根據ASHRAE-55及歐盟EN-15251熱適應標準計算出學校教室採用複合通風模式的冷房度時的能耗差異，發現自然通風主要的節能潛力發生在5~10月的夏季。雖然台灣夏季，自然通風有效性較低，但是採用自然通風節能效果可達50%。冬季時，雖然自然通風有效性較高，但因氣溫不高，空調需求低，故無法展現出其節能特性。研究中彙整出不同地區的室內熱量的全年冷房度日計算結果，若使用自然通風與空調溫度維持在28°C的情況相比，複合通風所減少的冷房度日超過60%。

Chu and Chiang (2013)採用三維大渦流(Large Eddy Simulation, LES)模式研究建築物內部傢俱、障礙物對建築物風壓通風之影響，研究成果發現室內家具會阻礙氣流的流動，障礙物斷面積愈大，風壓通風量會愈小，通風量的變化可用Chu and Wang (2010)的阻抗模式加以預測。Chu and Chiang (2014)再採用相同的模式研究建築物長度對無室內隔間建築物風壓通風之影響，研究成果發現縱深長的建築物，通風量小於縱深短的建築物。造成此現象的原因有兩個：(1)縱深短的建築物，迎風、背風面之間的壓差較大，導致通風量較大；(2)縱深長的建築物，室內阻力使得通風量較小。當建築物長度 L 大於建築物室內高度 $L/H > 5$ 倍時，室內阻抗便不可忽略，而當開口處於對角線的位置時，相較於開口處於建築物中央，會產生額外的室內阻抗，使通風效果變差，通風量的變化亦可用Chu and Wang (2010)的阻抗模式加以預測。

李怡萱 (2014)使用標準 $k - \epsilon$ 模式計算七種不同室內隔間的風壓通風，室外風速設定為 3.0 m/s ，其研究成果顯示：相對或相鄰兩側設置開口的平面設計，較能夠達到對流效果，形成自然通風的條件，而同側開口的對流效應較不明顯。但其模式只計算室內風速和通風路徑，並未計算建築物開口處的通風量，且其預測結果並未與實驗結果比對、驗證，其研究成果的正確性需要進一步確認。

曾淑翎 (2015)以 $k - \epsilon$ 模式研究強制排風設備對單棟四層樓透天型民宅的通風換氣率之貢獻程度，模擬在不同開口配置與來流條件下，建築物座向、開口部設計、外環境風場、氣候因素的影響權重。研究顯示主導建築物通風量的因子仍以座向與常年風向為主，當建築物外部開口搭配常年風向，確實可使建築物獲得規範要求的換氣率甚或更高，但在受到鄰棟遮蔽或座向不佳的設計，安裝於梯間頂層的強制排風扇，可有效的改善原先不佳的換氣率，對於建築群中自然通風不佳區域的建築物，合理配置的強制排風扇可提升建築物使用者熱舒適性，同時其能源消耗遠低於常用的空調設備。

Chu et al. (2015)利用風洞實驗與濃度衰減法研究同一面牆上有兩個開口之建築物的風壓通風，實驗結果發現當有兩個開口之建築物的換氣率高於只有一個開口的建築物的換氣率；當風向角介於 $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ (開口在迎風面)，兩開口類似貫流通風，換氣率大，而有室內隔間之建築物的換氣率又低於無室內隔間之建築物；當風向角介於 $90^\circ \sim 180^\circ$ (開口在側面及背風面)，換氣率小；且當風向平行於開口(開口在側面)時，開口分別在兩側牆的換氣率與開口在同一側牆的換氣率十分相近，亦即開口位置部會

影響剪力通風的換氣率。依據實驗結果推導出：單側雙開口建築物之換氣率的預測公式。

黃瑞隆 (2015)透過實測方式以探討自然通風對於住宅與複合式教室抵減空調之節能效果。在選定之建築物長期監測室內外的溫濕度，以估算室內熱舒適環境之變化與空調開啟時間，再以冷房度法計算空調耗能量與節能效益，最後透過與理論上應開空調之時間比對換算折減率。此外，針對各實測案例換算空間配置與開窗下的自然通風潛力VP，來分析其與實際空調折減效果之關係。研究結果發現：綠建築評估手冊所建議之住宅類自然通風潛力VP與實際空調抵減效果Vac之關係並不明顯。

Chu and Wu (2017)結合自然通風模式和一個質量傳輸模式來計算有隔間建築物中一氧化碳的濃度變化，並以風洞模型實驗濃度衰減法驗證模式所預測之濃度變化。驗證後之傳輸模式便用來評估在自然通風對情況下，通風量、初始濃度和房間的體積大小等參數對建築物之內一氧化碳的濃度和消散時間的影響。

綜觀以上的研究可知，前人研究大多採用CFD數值模式或風洞模型實驗針對建築物某個特殊的通風狀況進行深入的研究，做學理上的探討，其研究結果較難應用於預測其他狀況之通風量。且CFD模式需要設定許多流場參數，建築師大多不會正確地使用。國內建築界缺少一本針對建築物自然通風有完整性介紹的書籍，亦無設計手冊可供建築師參考，來計算一般建築物的自然通風量，本計畫將彌補此缺憾。

第四節 計畫內容和方法

台灣夏季濕熱的氣候狀況，使得許多建築物24小時地使用冷氣空調來維持建築物室內環境的舒適性。但是不分日夜地使用這些空調設備，亦會耗損大量的電力。若能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，將可達到建築節能之目的。因此建築師需要一個正確且容易使用的通風模式來計算自然通風狀況下的換氣率。

本計畫整理風壓通風與浮力通風的相關理論與計算公式，結合流體質量守恆原理、多區間通風模式和經驗模式，建構一個計算多區間建築物的自然通風量與換氣率的模式，藉由風洞實驗之數據及CFD模式來驗證通風模式之預測結果，並利用不同的建築物案例來說明各種狀況下自然通風量及換氣率的計算方式，案例包括貫流通風、單側通風、風切通風、住宅、辦公室、教室、廠房、旅館等建築。有系統地說明室外風速、風向、開口面積、位置及阻礙通風之因素對建築物自然通風的影響，且將通風

計算模式寫入Excel軟體，建築設計者可以輸入建築物的開口面積、當地的平均風速、盛行風向等氣象資料，便可計算建築物的自然通風量或換氣率。當建築物的自然通風可使得室內環境達到熱舒適的狀況，便不需要使用冷氣空調。本計畫並比較不同建築案例之自然通風量和綠建築評估手冊計算之自然通風潛力VP值。

本研究之成果將出版一本建築物自然通風設計手冊，藉由案例來介紹自然通風量的計算方式，讓國內建築師和一般民眾了解自然通風量的設計概念，祈望建築師能有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出真正節能的建築物。並讓建築物使用者瞭解自然通風的操作方式與時機，住戶可依據其需求與室內外的氣候狀況，自行控制建築物的門窗的開闔，來調節自然通風量，使得室內環境達到舒適，並降低建築物的耗能。

本研究報告共包括五章，主要章節內容為：第一章為緒論，說明研究的背景、研究目的及各章的內容；第二章介紹建築物通風的研究方法及相關的國內外研究文獻，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；第三章說明建築物自然通風的理論；第四章介紹建築物自然通風潛勢的評估方法；第五章藉由不同的建築物自然通風的計算案例，說明自然通風量之計算方式；第六章為結論與建議事項。

第二章 通風模式

建築物的自然通風受到通風驅動力(室外風速、風向)、開口面積、位置、室內隔間形式等因素的影響，無法以單一公式計算。本章先介紹室外風場，再依據室內隔間形式，將建築物通風計算模式區分為單區間模式、多區間模式，以下分述之：

第一節 大氣邊界層流

地表空氣的流動會受到地表邊界的影響，水平向風速的垂向剖面成不均勻分佈，稱為大氣邊界層(Atmospheric Boundary Layer)。大氣邊界層的厚度約為200公尺~1000公尺之間，其中空氣的流動受到地表的摩擦阻力、溫度差異和地球自轉的影響，較為複雜。大氣邊界層之上的對流層，受地表影響較小，地球自轉的影響較大，水平流速成均勻分佈，稱為自由流(Free stream)。因為大部份的建築物、人類活動皆在大氣邊界層之中，故建築師必須了解大氣邊界層中的風場。

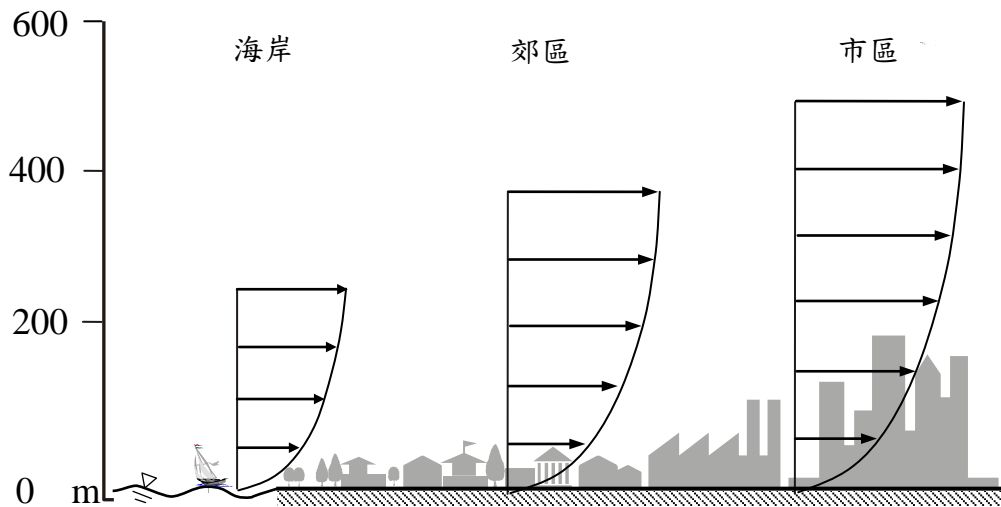


圖 2-1 不同地況之平均風速剖面

資料來源：本研究繪製

一般而言，地表風場可依據地表溫度變可分為：穩定、不穩定及中性大氣狀況。大氣穩定度對地表的物染物擴散、和熱島效應的影響較大，對於高風速下，結構物所受的風力負載影響較小，故研究結構物與風場之間的交互作用時往往忽略穩定度的影響，僅以中性大氣邊界層模擬之。換言之，平均風速的垂向分佈可以較簡單的對數或指數剖面表示：

(a) 對數剖面(Logarithmic profile)：

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - z_d}{z_o} \quad (2-1)$$

(b) 指數剖面(Power law profile)：

$$\frac{U(z)}{U_o} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad (2-2)$$

其中 U_o 為邊界層外之風速，又稱為梯度風速(Gradient velocity)， δ 為梯度高度(Gradient height)， α 為指數。梯度高度與指數視地表的地況而定，表2-1列舉四種不同的地況的粗糙程度之分類：

- (a)地況A：大城市之市中心或該地區水平距離至少800公尺或主建築物高度10倍(兩者取較大值)的範圍內大部分(50%以上)的建築物高度皆大於20公尺的地區。
- (a)地況B：市郊、小市鎮或該地區水平距離至少500公尺或主建築物高度10倍的範圍(兩者取較大值)的範圍內大部分(50%以上)的建築物高度介於10~20公尺的地區。
- (b)地況C：地勢平坦開闊之草原，或地面零星散佈的地物高度皆小於10公尺的地區，或海岸地區由水面方向吹過來的強風(風速大於10 m/s)。
- (d)地況D：平坦無障礙物之海岸地區或湖岸地區，風由水面方向吹過來，距海岸線500公尺或主建築物高度10倍的範圍(兩者取較大值)，方適用此種地況。

表 2-1 不同地況的邊界層高度與指數

地況分類	地況特性	指數 α 值	δ (m)	I (%)
地況 A	大城市之市中心區	0.32	500	25 ~ 50
地況 B	郊區、小市鎮	0.25	400	20 ~ 30
地況 C	開闊之平原	0.15	300	15 ~ 20
地況 D	地勢平坦之海岸地區	0.11	215	10 ~ 15

資料來源：本研究團隊整理之數據

第二節 台灣六都的風場

中央氣象局在台灣地區與離島共設有32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。除此之外，

無人之自動氣象站約有400多個測站。氣象測站名稱、站號海拔、風速計距離當地地面高度、設立時間等資料可在網路上查得。因此建築師可以向中央氣象局取得最靠近建築基地之氣象測站的風速、風向觀測資料進行統計分析，計算該地區年平均風速與盛行風向(又稱為常時風向，在建築基地發生機率最大的風向)。再利用指數律將氣象站的年平均風速轉換成建築物開口高度處的風速：

$$\frac{U(z)}{U_{met}} = \left(\frac{z}{z_{met}} \right)^{\alpha} \quad (2-3)$$

式中 H_{met} 為氣象測站的風速計離地面之高度， z 為建築物開口位置離地面之高度， α 為測站所在位置之地況指數，其值可參考建築耐風設計規範與解說。

風向為風在水平方向的角度，一般可將風向分為16個方位，以正北方為 0° ，順時針方向將風向分為每 22.5° 間隔一個方位：北(N)、北北東(NNE)、東北(NE)、東北東(ENE)、東(E)、東南東(ESE)、東南(SE)、南南東(SSE)、南(S)、南南西(SSW)、西南(SW)、西南西(WSW)、西(W)、西北西(WNW)、西北(NW)、北北西(NNW)。當風速小於 0.3 m/s 時，風標不動的狀況稱為靜風(Calm)。計算各地風速、風向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，風速資料至少需要有3年以上資料，來計算當地的平均風速和各風向的發生機率。圖2-2~2-7為台灣六都的風花圖，表2-2為其平均風速與盛行風向。

表 2-2 台灣六都的平均風速與盛行風向

地區	平均風速(m/s)	盛行風向	發生機率
台北市	3.15	東風、東北及東北東	52 %
新北市	2.02	東北東、南南西、及東北	61 %
桃園市	3.78	東北風、東北東及北北東風	48 %
台中市	1.61	北風、北北東及北北西	37 %
台南市	3.09	北風、北北東及北北西	51 %
高雄市	2.26	北風、西北、西北西、北北西	42 %

資料來源：本研究團隊整理之數據

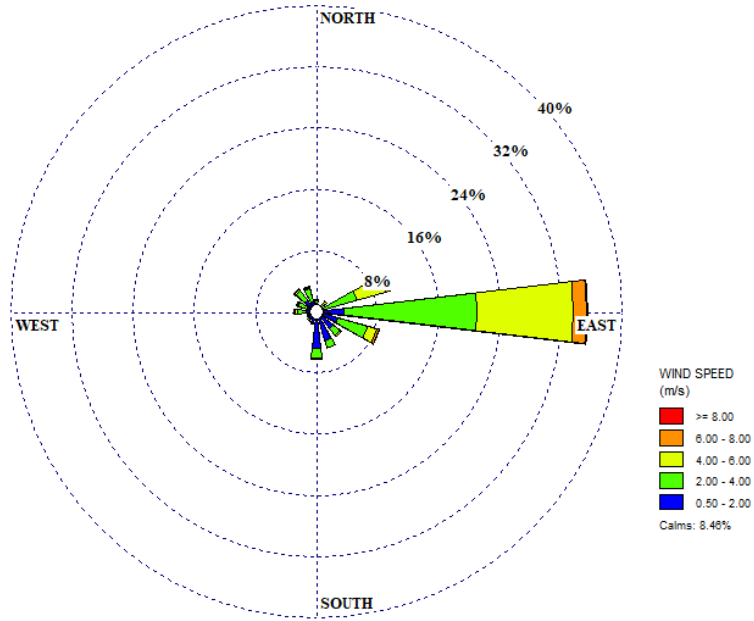


圖 2-2 台北市全年的風花圖(2000-2008)

資料來源：本研究團隊繪製

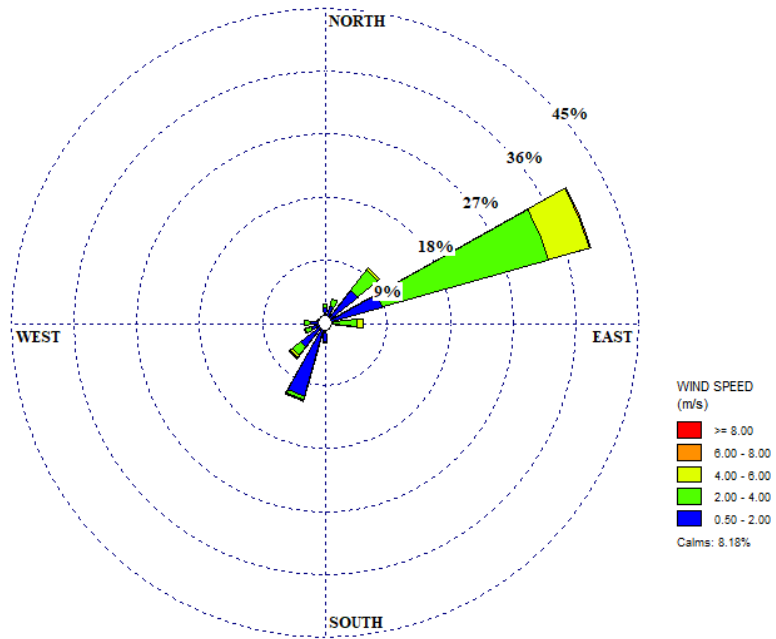


圖 2-3 新北市全年的風花圖(2000 - 2008)

資料來源：本研究團隊繪製

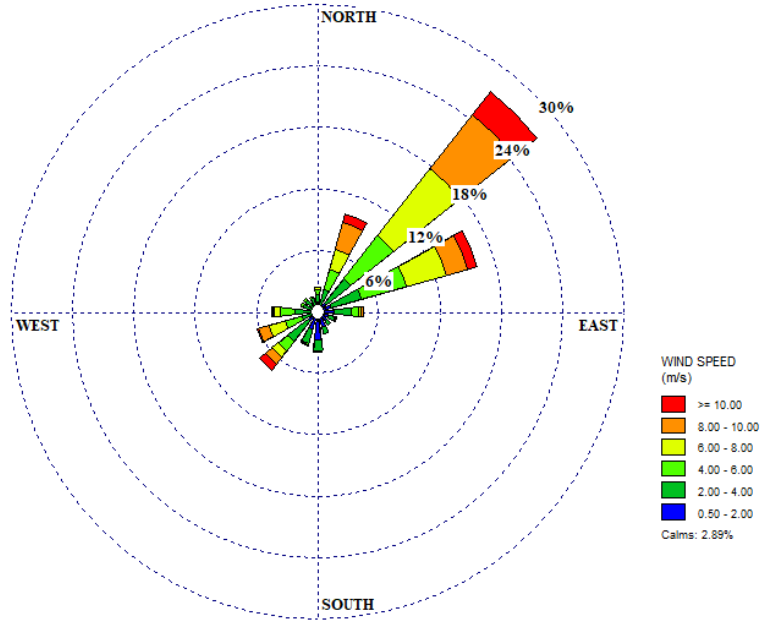


圖 2-4 桃園市全年的風花圖(2018)
資料來源：本研究團隊繪製

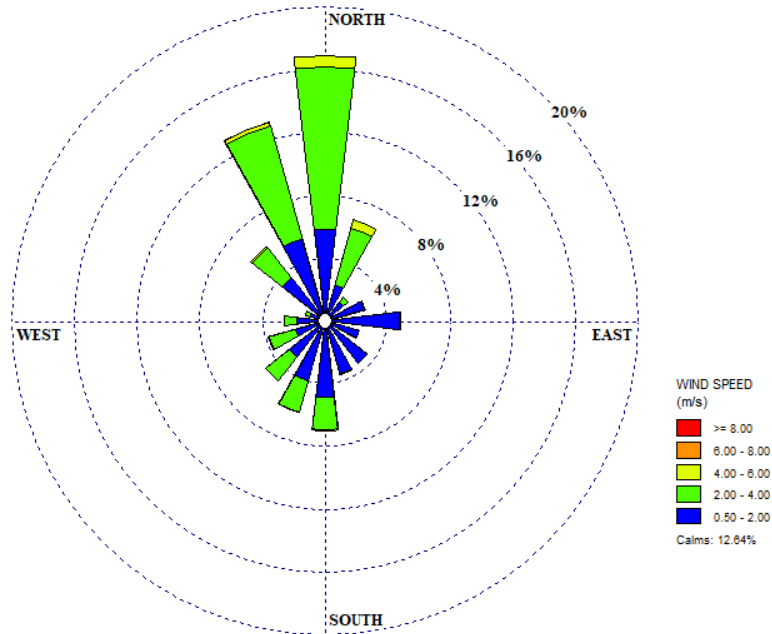


圖 2-5 台中市全年的風花圖(2000-2008)
資料來源：本研究團隊繪製

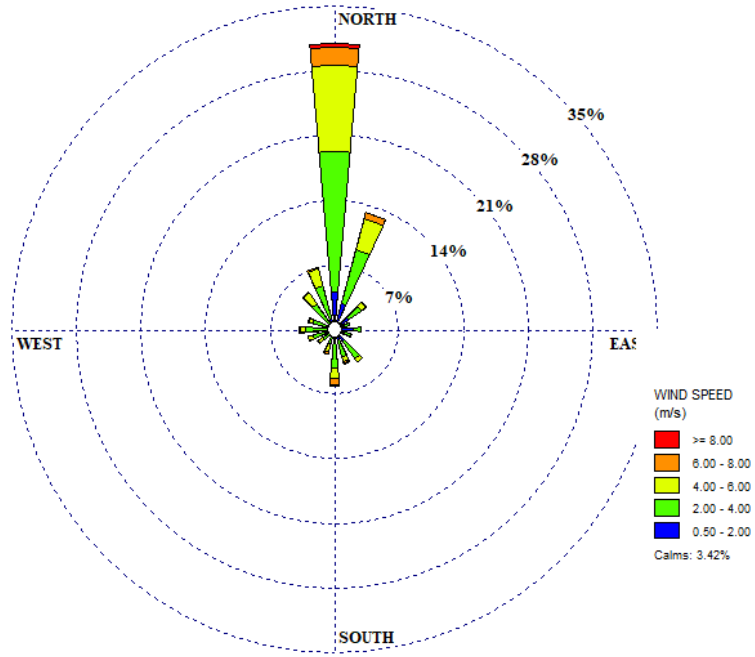


圖 2-6 台南市全年的風花圖(2000-2008)

資料來源：本研究團隊繪製

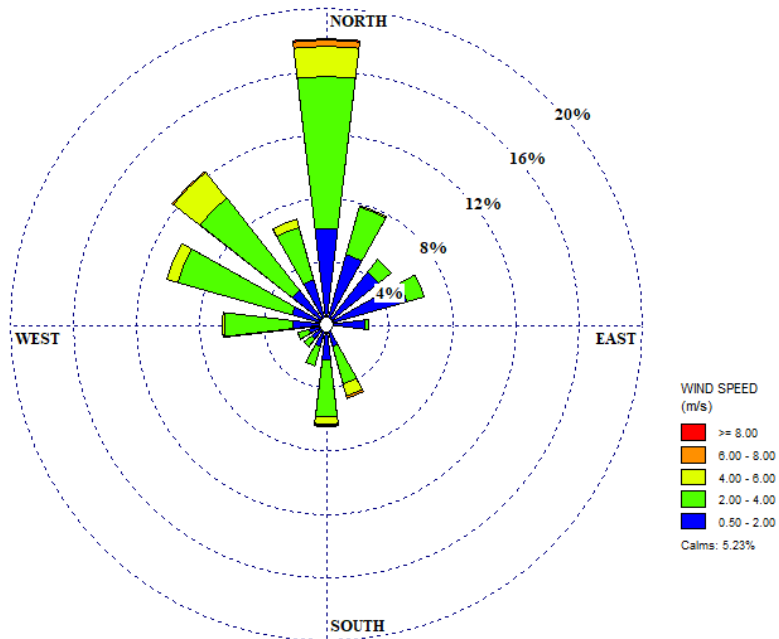


圖 2-7 高雄市全年的風花圖(2000-2008)

資料來源：本研究團隊繪製

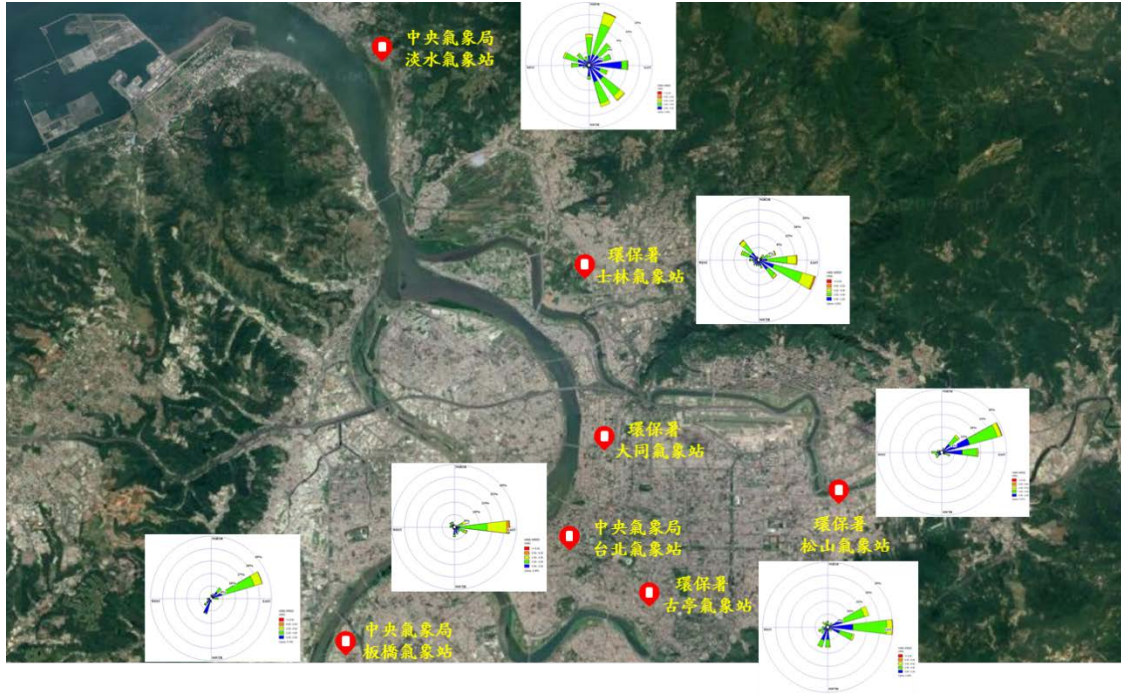


圖 2-8 台北各區全年的風花圖(2000-2008)
資料來源：本研究團隊繪製

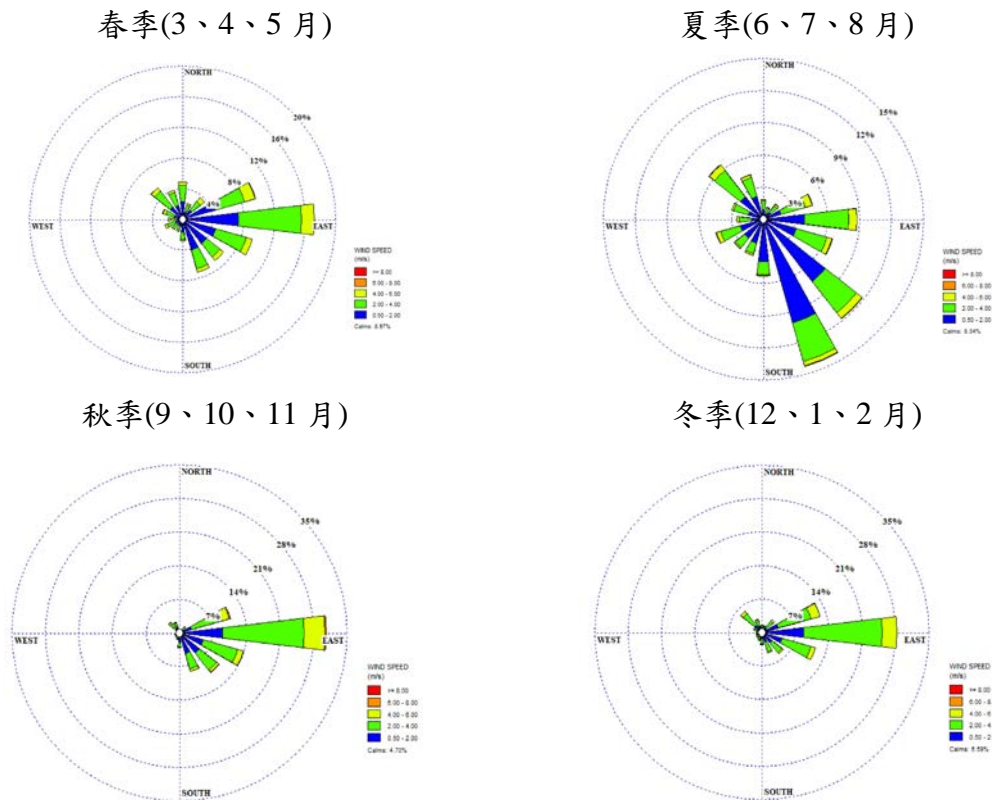


圖 2-9 台北氣象站各季的風花圖(2000-2008)
資料來源：本研究團隊繪製

第三節 單區間通風模式

此節所描述的风壓通風模式，針對建築物室內無隔間之單區間(Single zone)的风壓通風，可依據流體力學的伯努利原理(Etheridge and Sandberg, 1996; Linden, 1999)，用孔口方程式(Orifice equation)計算流經過建築物對外門窗開口的通風量：

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \quad (2-4)$$

式中A為開口面積， $|\Delta P| = |P_e - P_i|$ 為室外和室內壓力 P_i 的差值的絕對值， ρ 為空氣密度， C_d 為流量係數(Discharge coefficient)。流量係數 C_d 與開口是否裝有紗窗、百葉窗、外推窗有關。表2-3為實驗量測值(Chu et al., 2009)，紗窗的流量係數最大，外推窗的流量係數最小。但(2-5)式中室內壓力 P_i 是未知數，故無法直接計算風壓通風量。

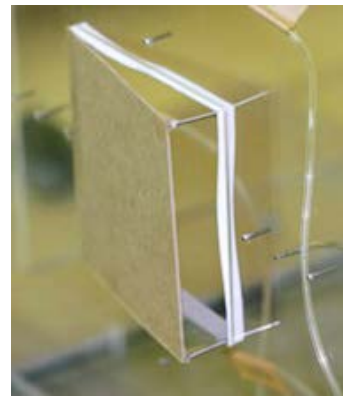
表 2-3 紗網窗、百葉窗、外推窗之流量係數



百葉窗 $C_d = 0.50$



紗窗 $C_d = 0.60$



外推窗 $C_d = 0.20$

資料來源：本研究團隊整理

當門窗關上但仍有隙滲時，室外的空氣仍可能因為壓差而由門窗的縫隙滲入，此現象稱為風滲(Air infiltration)或隙縫風，流況大多屬於層流。若開口為長條狀的矩形開口(Crack)，通風量可以平面普修力流(Plane Poiseuille flow)的方式計算：

$$Q = \frac{Ad^2}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (2-6)$$

式中d為開口的間隙，L為開口在流向上的長度， μ 為空氣的動力黏滯係數。綜合以上二式，通風量可以下式計算：

$$Q = kA(\Delta P)^n \quad (2-7)$$

式中 k 為流量係數，指數 n 會隨流況、開口大小等因素而定，約為 $0.6 \sim 0.7$ (Awbi, 2003)。當一棟建築物在迎、背風面各有一個對外開口時，則流經開口的通風量必須滿足質量守恆理論，流入的風量等於流出的風量：

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (2-8)$$

下標1、2分別代表迎風面和背風面。在一般大氣壓力狀況下，溫差不大時，空氣密度可視為定值， $\rho_1 = \rho_2$ 。故：

$$Q_1 = Q_2 \quad (2-9)$$

流經開口的通風量可利用孔口方程式(orifice equation)來計算：

$$Q_1 = C_{dw} A_w \sqrt{\frac{2|\Delta P_1|}{\rho_e}} \quad (2-10)$$

$$Q_2 = C_{dL} A_L \sqrt{\frac{2|\Delta P_2|}{\rho_e}} \quad (2-11)$$

其中 A_w 為迎風面(Windward)外牆開口面積， A_L 為背風面(Leeward)開口面積， C_d 為流量係數。在建築物內外有溫差，室內屬於完全混合的狀況下，空氣會因為熱浮力由低處開口流入，高處開口流出。故建築物開口處內外的壓差為：

$$\Delta P_1 = P_1 - P_i + \frac{\Delta T}{T_e} \rho_e g z_1 \quad (2-12)$$

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 - \frac{\Delta T}{T_e} \rho_e g z_2 \quad (2-13)$$

其中 P_{e1} 、 P_{e2} 分別室外有風時風力施予迎風面和背風面外牆的動壓力， P_i 為室內的壓力， z_1 、 z_2 分別為低處開口、高處開口離地面的高度， $\Delta T \rho g z / T_e$ 為在高度 z 處因為室內外溫差 ΔT 所造成的靜壓差異(又稱為熱壓)， g 為重力加速度。帶入質量守恆 $Q_1 = Q_2 = Q$ 可得：風向垂直於迎風面開口的通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2|P_1 - P_2|}{\rho_e} + \frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} \quad (2-14)$$

其中 A^* 為有效開口面積(Effective opening area)：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} \quad (2-15)$$

當室外無風的狀況， $P_{e1} = P_{e2} = 0$ ，通風由熱浮力所主導，因室內外溫差所造成的通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} \quad (2-16)$$

當室外風速 $U > 2.0 \text{ m/s}$ 的狀況，室內外溫差很小 ($\Delta T < 5^\circ\text{C}$) 時，風壓通風量大於熱浮力通風量。風向垂直於迎風面開口的通風量為：

$$Q = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} \quad (2-17)$$

式中 U 為室外風速， $C_{p1} = (P_1 - P_o)/0.5\rho_e U^2$ 為外牆開口處的風壓係數， P_o 為參考壓力，一般為不受建築物干擾處的大氣壓力。以上通風量計算公式由理論推導而得，適用於計算不同建築物在不同風速狀況，正確性較經驗公式高。

建築物外牆的風壓係數受建築物外型、位置的影響。矩形建築物迎風面外牆的風壓係數為正值(高於大氣壓力)，其值介於 $0.50 \sim 0.90$ ；背風面外牆為負值(低於大氣壓力)，其值介於 $-0.10 \sim -0.60$ 。風壓係數可由風洞模型實驗或可靠的計算流體動力學 CFD 模式計算之，若沒有實驗數據或 CFD 模擬結果時，迎背風面壓差可採用 $\Delta C_p = C_{pw} - C_{pL}$ 約等於 1.0 ，因此通風量約等於：

$$Q \approx A^* U \quad (2-18)$$

此式說明通風量與室外風速 U 成線性正比，但通風量並不和開口面積 A 成線性正比關係。

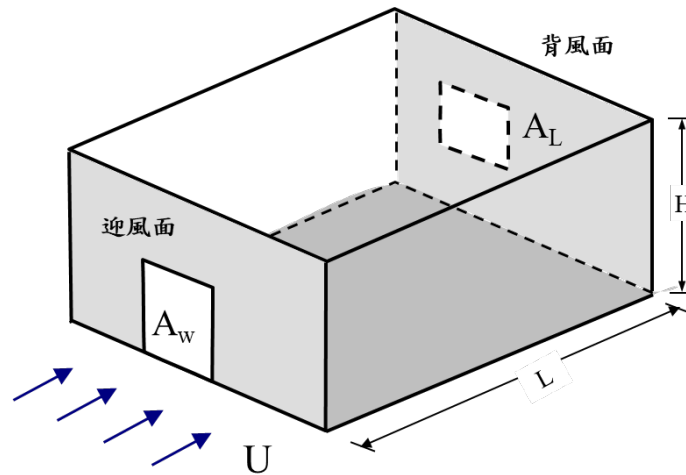


圖 2-10 單區間雙開口貫流通風之示意圖

資料來源：本研究團隊繪製

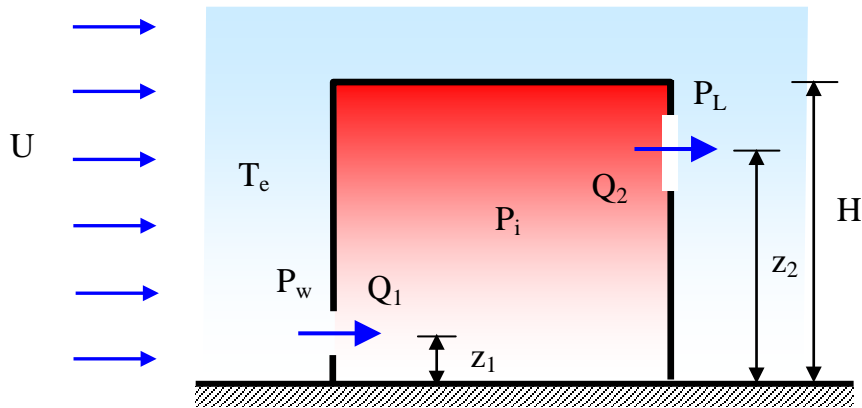


圖 2-11 單區間雙開口貫流通風之示意圖

資料來源：本研究團隊繪製

當建築物迎風面、背風面各有許多個開口，其通風量亦須遵守連續方程式：

$$\sum Q_w = \sum Q_L \quad (2-19)$$

假設外牆的風壓均勻分佈，則風壓係數 C_{p1} ， C_{p2} 為定值，利用孔口方程式可得風壓通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2|P_1 - P_2|}{\rho_e} \right]^{1/2} \quad (2-20)$$

其中 A^* 為多開口之有效開口面積(Effective opening area)：

$$A^* = \frac{\sum C_{dwi} A_{wi} \sum C_{dLj} A_{Lj}}{\left[(\sum C_{dwi} A_{wi})^2 + (\sum C_{dLj} A_{Lj})^2 \right]^{1/2}} \quad (2-21)$$

下標 i 、 j 分別為迎風面和背風面開口的數目， A_w 為迎風面(Windward)開口面積， A_L 為背風面(Leeward)開口面積。開口愈多，開口面積愈大，則有效開口面積 A^* 愈大，通風量 Q 亦愈大。因此建築物面對當地盛行風向的外牆上宜有一個大型開口(如落地窗)，且背面風牆或側牆也有對外之開口，可造成貫流通風，通風量大。若建築物使用者覺得通風量過大，可自行開闔對外門窗來控制通風量。

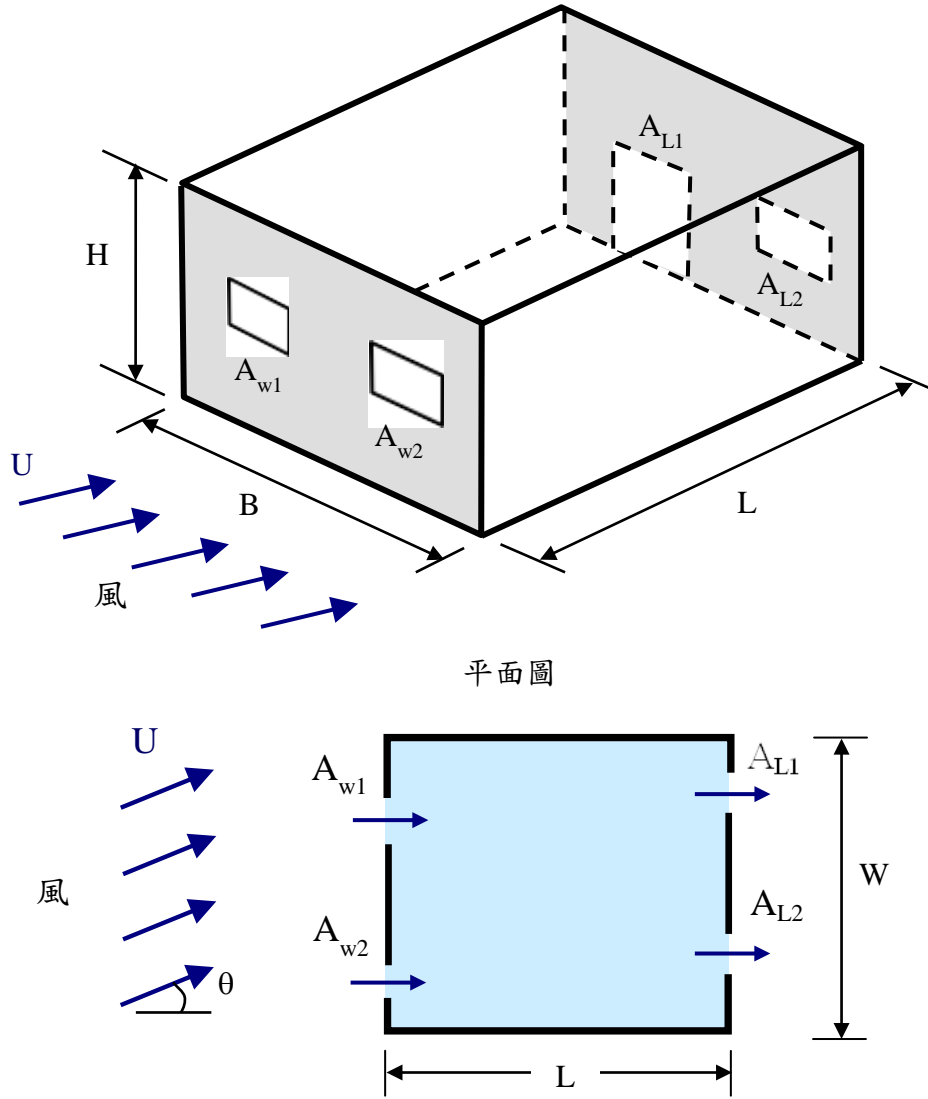


圖 2-12 單區間多開口建築物之示意圖

資料來源：本計畫研究團隊繪製

第四節 不同風向之貫流通風

式(2-20)為風向垂直於建築物開口($\theta = 0^\circ$)的貫流通風量計算方式，依據 Chu et al. (2011)風洞實驗和示蹤劑濃度量測結果顯示：當風向與開口夾一個角度時，風壓通風量可以用餘弦定律(Cosine law)來下式計算風向不正對開口的通風量：

$$Q(\theta) = Q_0 \cos \theta \quad (2-22)$$

式中 Q_0 為風向角 $\theta = 0^\circ$ 時的貫流通風量。如圖 2-11 所示，風向角 $\theta = 0^\circ$ 時，貫流通風量最大；風向角 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ 之間，通風量隨著風向角的增加而遞減。這是因為當風向角不為零時，只有正對開口的風速分量 $V \cos \theta$ 才會流入開口，平行於建築物開口的風速分量 $V \sin \theta$ 並不會造成貫流通風。當風向與開口的夾角介於 -45° 或 45° 時，通風量為貫流通風量 Q_0 (風向角 $\theta = 0^\circ$) 的 70%。

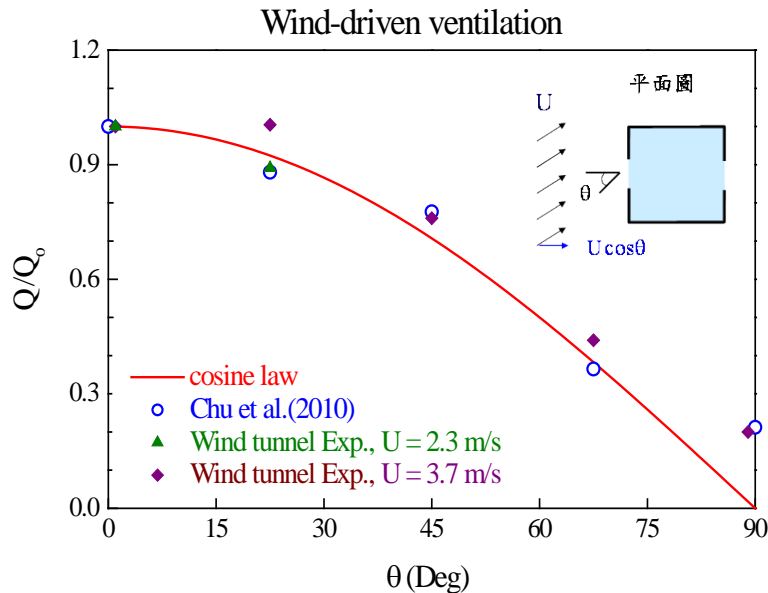


圖 2-13 不同風向角之風壓通風量

資料來源：本計畫研究團隊整理繪製

當風向平行於建築物開口(風向角 $\theta = 90^\circ$)時，如圖 2-12 所示，開口的風剪力(風切)所產生的紊流還是會促使室內外的空氣交換，但通風量遠小於風向角 $\theta = 0$ 的貫流通風量。建築物雙側皆有開口的無因次通風量(Chu et al., 2011)為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.077 \quad (2-23)$$

只有單側一個開口的風切通風量(風向角 $\theta = 90^\circ$)為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.018 \quad (2-24)$$

只有一個開口在迎風面，且風向垂直於建築物開口(風向角 $\theta = 0^\circ$)的通風量為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.025 \quad (2-25)$$

如圖2-12所示，以上兩式不會隨室外風速而變，且建築物雙側皆有開口的風切通風量遠大於單側單開口通風量，這是因為雙開口的壓力變化幅度較大，促使室內外空氣交換速率較高。單側有雙開口的風切通風量(Chu et al., 2015)為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.053 \quad (2-26)$$

圖2-15顯示不同風向角狀況下，建築物單側有雙開口通風量的實驗量測結果。由此圖可看出：雙開口在迎風面(風向角 $0 < \theta < 90$)的通風量遠大於開口在背風面(風向角 $90 < \theta < 180$)的通風量。且建築物內無隔間的通風量大於室內有隔間的通風量。

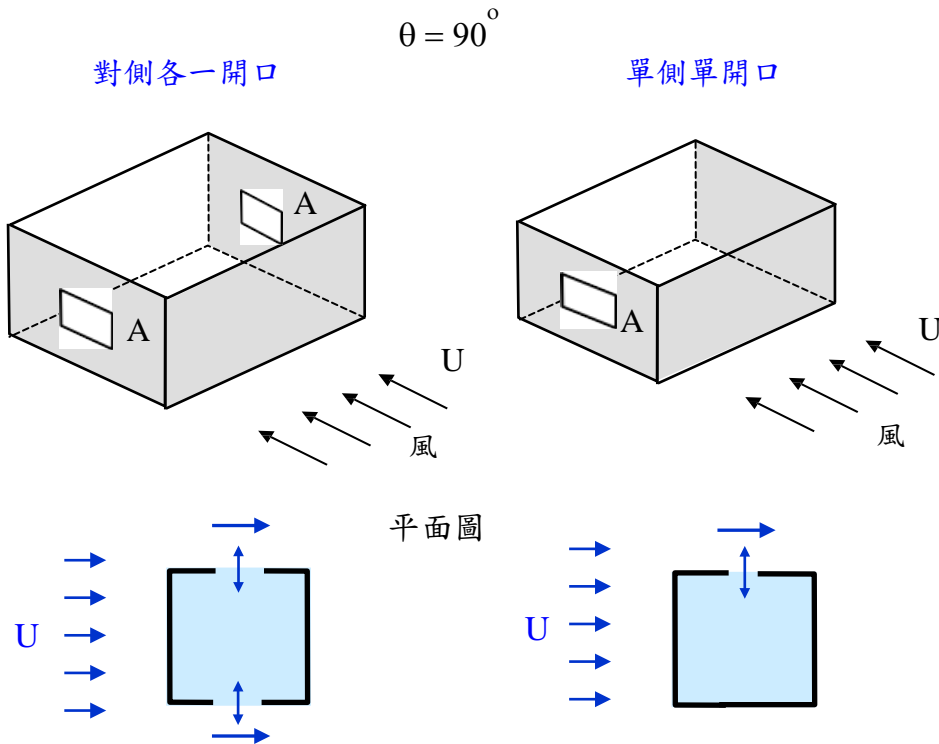


圖 2-14 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖

資料來源：本計畫研究團隊整理繪製

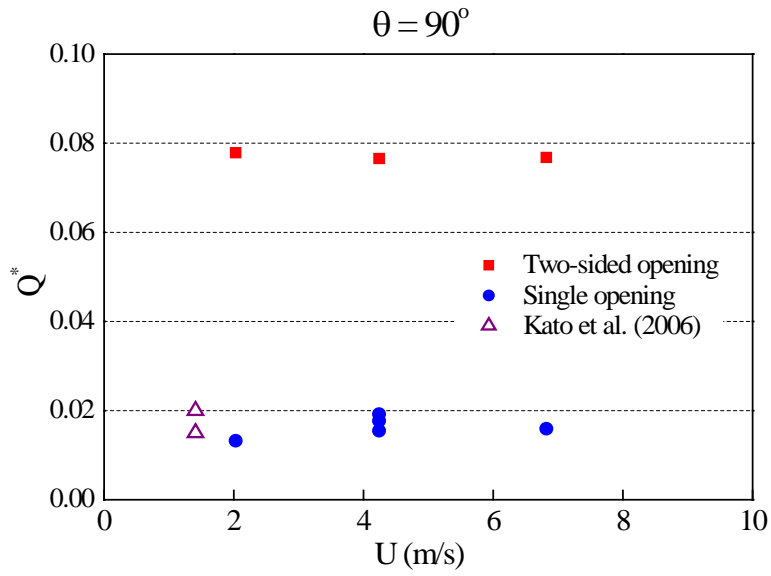


圖 2-15 雙側雙開口及單側單開口的剪力通風量

資料來源：本計畫研究團隊繪製

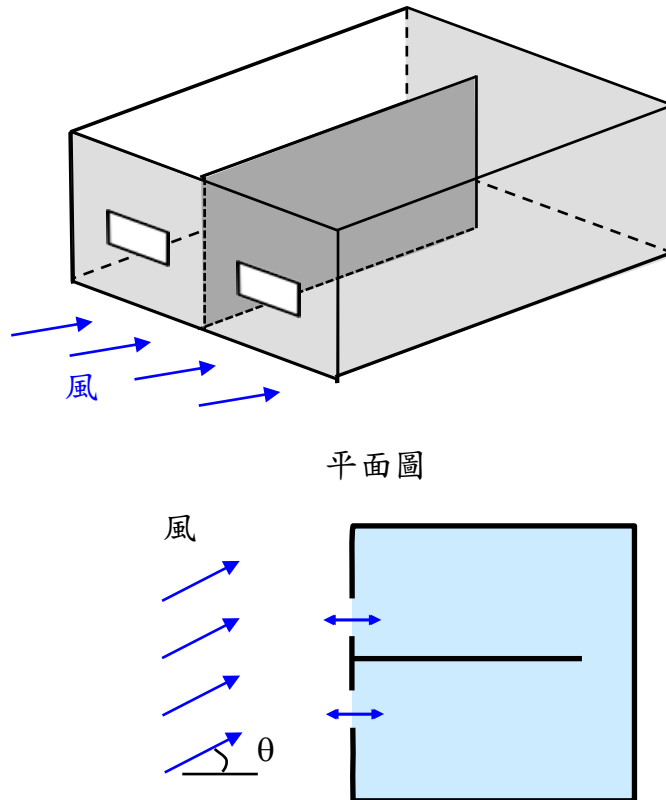


圖 2-16 有室內隔間雙開口建築物通風之示意圖

資料來源：本計畫研究團隊繪製

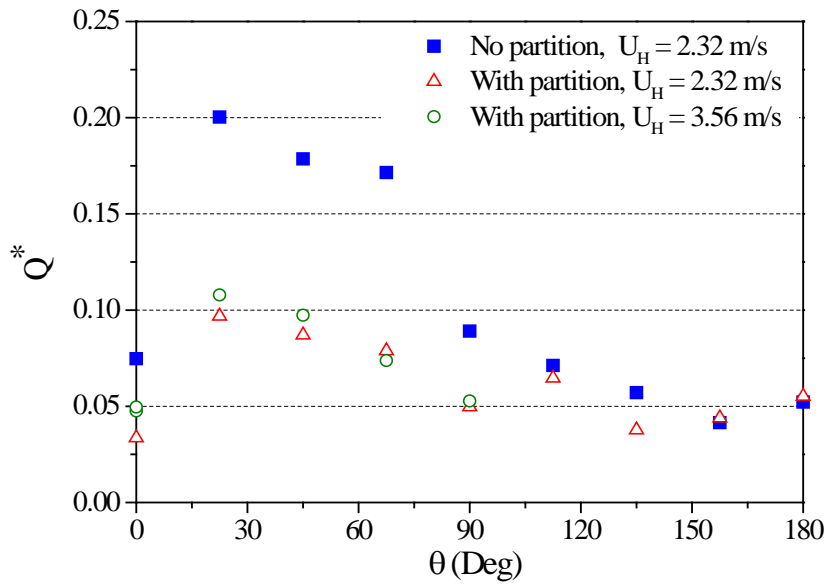


圖 2-17 室內隔間對雙開口建築物通風量之影響
資料來源：本計畫研究團隊整理繪製

第五節 多區塊貫流通風模式

當一棟建築物迎風面、背風面各有一個開口(Opening)，迎風面牆上的開口面積為 A_1 ，背風面牆上的開口面積為 A_2 。室內隔成兩個房間，兩個房間中有一個開口，開口面積為 A_i ，如圖 2-18 所示。開口面積比：

$$A_{r1} = \frac{A_1}{A_i} \qquad A_{r2} = \frac{A_2}{A_i} \qquad (2-27)$$

風壓通風的通風量計算公式為：

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \qquad (2-28)$$

式中 A 為開口面積， ΔP 為壓差， ρ 為空氣密度， C_d 為開口的流量係數。依據質量守恆：

$$\rho Q_1 = \rho Q_i = \rho Q_2 \qquad (2-29)$$

式中 Q 為通風流量，下標 1 代表迎風面開口，下標 2 代表背風面開口，下標 i 代表室內。在等溫(Isothermal)的狀態下，空氣密度 ρ 為定值，故：

$$Q_1 = Q_i = Q_2 \qquad (2-30)$$

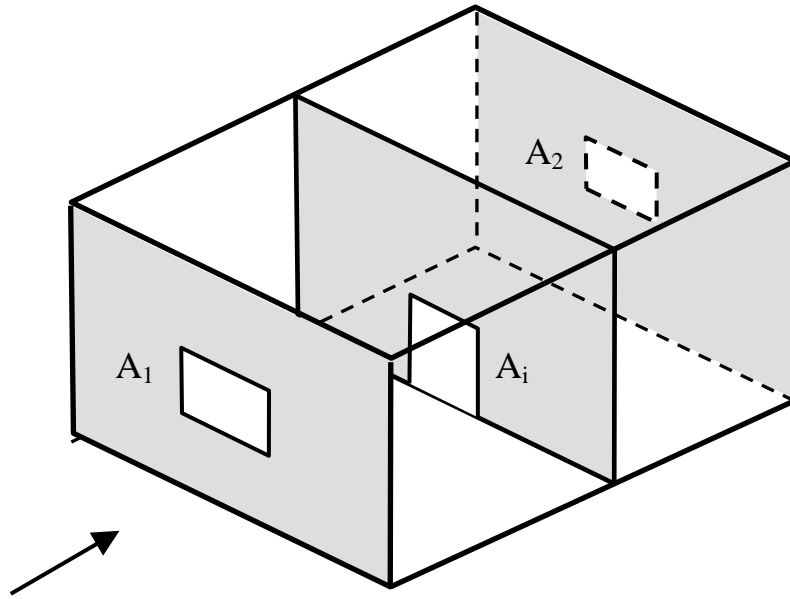


圖 2-18 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖

資料來源：本研究團隊整理繪製

代入通風量公式：

$$C_{d1}A_1\sqrt{|P_{e1}-P_{i1}|} = C_{di}A_i\sqrt{|P_{i1}-P_{e2}|} \quad (2-31)$$

$$C_{di}A_i\sqrt{|P_{i1}-P_{i2}|} = C_{d2}A_2\sqrt{|P_{i2}-P_{e2}|} \quad (2-32)$$

式中 P_{i1} 為第一個房間的室內風壓， P_{i2} 為第二個房間的室內風壓， P_{e1} 為迎風面牆上的室外風壓， P_{e2} 為背風面牆上的室外風壓。共有 5 個未知數（2 個壓力 P ，3 個流量 Q ），5 個方程式（2 個連續方程式，3 個通風量方程式）。若迎風面、背風面開口皆為小型開口，室外風壓不受開口影響。

以上兩式整理可得室內外壓力平衡方程式：

$$P_{e1} = \frac{(1 + A_{r1}^2 C_{dr1}^2)}{A_{r1}^2 C_{dr1}^2} P_{i1} - \frac{P_{i2}}{A_{r1}^2 C_{dr1}^2} \quad (2-33)$$

定義流量係數比：

$$C_{dr1} = \frac{C_{d1}}{C_{di}} \quad C_{dr2} = \frac{C_{d2}}{C_{di}} \quad (2-34)$$

由上式可得：

$$P_{i2} = \frac{P_{i1}}{1 + A_{r2}^2 C_{dr2}^2} + \frac{A_{r2}^2 C_{dr2}^2}{1 + A_{r2}^2 C_{dr2}^2} P_{e2} \quad (2-35)$$

可定義無因次參數：

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_{r1} C_{dr1} \\ \alpha_2 &= A_{r2} C_{dr2} \end{aligned} \quad (2-36)$$

整理可得無因次之開口平均風速等於：

$$\frac{Q}{U A_1} = \frac{u_1 A_1}{U A_1} = C_{d1} \left[\frac{\alpha_2^2 (C_{p1} - C_{p2})}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_2^2} \right]^{0.5} \quad (2-37)$$

換言之，若室外風速 U 、室外風壓係數 C_{p1} 、 C_{p2} 、開口的面積 A_1 、 A_2 、 A_i ，流量係數 C_{d1} 、 C_{d2} 、 C_{di} 為已知數，可求得通風量 Q 和開口平均風速。若開口面積 $A_1 = A_2 = A_i$ ，且開口的流量係數 $C_{d1} = C_{di} = C_{d2}$ ，則 $\alpha_1 = 1$ ， $\alpha_2 = 1$ ，流入室內的通風量為：

$$Q = A_1 C_{d1} \left[\frac{C_{p1} - C_{p2}}{3} \right]^{0.5} \quad (2-38)$$

比較此式和(2-17)式可知：在相同室外風速、門窗面積，有隔間的建築物自然通風量小於無隔間建築物的通風量。建築物外牆的風壓可以無因次之壓力係數表示：

$$C_p = \frac{P_1 - P_o}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2-39)$$

式中 U 、 P_o 為室外不受建築物影響處之風速、壓力， ρ 為空氣密度。

第六節 多區塊多開口模式

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 2-19 所示。當室外風速 U 、外牆風壓係數 C_{pe} 、各個房間的開口面積 A 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 。依據質量守恆定律，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.)：

$$\sum_{j=1}^m \rho Q_j = 0 \quad (2-40)$$

其中 m 為該房間開口的數目，下標 j 表示第 j 個開口。在氣壓、氣溫變化很小的狀況下，空氣密度 ρ 可視為定值，故：

$$\sum_{j=1}^m Q_j = 0 \quad (2-41)$$

流入房間的流量為正，流出為負。各開口的流量皆以孔口公式(Orifice eqn.)計算：

$$Q_j = C_{dj} A_j \left[\frac{2(P_j - P_{ri})}{\rho} \right]^{0.5} \quad (2-42)$$

其中 P_{ri} 表示第 i 個房間的室內壓力(Internal pressure)。帶入上式可得：

$$\sum_j^m C_{dj} A_j (P_j - P_{ri})^{0.5} = 0 \quad (2-43)$$

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：

$$P_r = P_1 + \Delta_1 \quad (2-44)$$

其中 Δ_1 表示第 1 個室內壓力的修正值。帶入上式可得：

$$\sum_{j=1}^m C_{dj} A_j [P_j - P_1 - \Delta_1]^{0.5} = 0 \quad (2-45)$$

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：

$$C_{dj} A_j (P_j - P_1 - \Delta)^{0.5} = C_{dj} A_j \left[(P_j - P_1)^{0.5} - \frac{\Delta}{2} (P_j - P_1)^{-0.5} + \frac{\Delta^2}{4} (P_j - P_1)^{-1.5} + \dots \right] \quad (2-46)$$

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

$$\sum_{j=1}^m \left[C_{dj} A_j (P_j - P_1)^{0.5} - \frac{\Delta}{2} C_{dj} A_j (P_j - P_1)^{-0.5} \right] = 0 \quad (2-47)$$

因此壓力修正值：

$$\Delta = \frac{2 \sum_{j=1}^m C_{dj} A_j (P_j - P_1)^{0.5}}{\sum_{j=1}^m C_{dj} A_j (P_j - P_1)^{-0.5}} \quad (2-48)$$

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 Δ ，再計算下一次迭代的室內壓力 P_{ri} ：

$$P_{ri}(k+1) = P_{ri}(k) + \Delta_1(k) \quad (2-49)$$

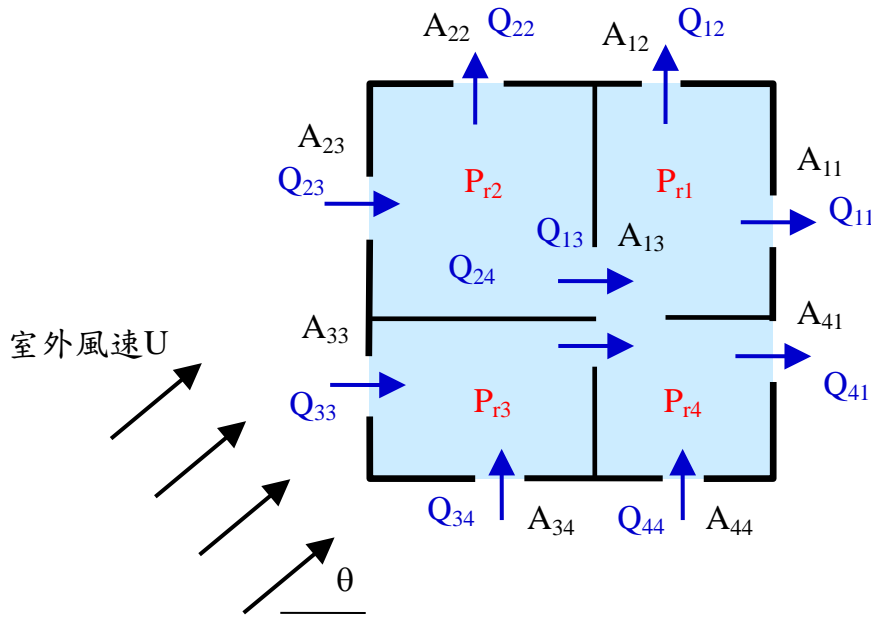


圖 2-19 建築物有室內隔間風壓通風之示意圖
資料來源：本計畫研究團隊整理繪製

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($\Delta_1/P_{r1} < 0.001$)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 $0 < r < 1$ 。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：

$$P_{ri}(k+1) = P_{ri}(k) + r \cdot \Delta_i(k) \quad (2-50)$$

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。

第七節 通風量計算步驟

當影響建築物自然通風的因素同時存在，譬如外牆開口與盛行風向有一夾角，開口有裝百葉窗(或紗窗)，有圍牆部份遮蔽外牆上的開口，建築內部縱深長度超過 10 m，周遭有其他建築物影響貫流通風，通風量 Q 可以下式計算：

$$Q = K_d K_o K_b K_s K_L Q_o \quad (2-51)$$

式中 Q_o 為風向角為零，外牆開口無裝置，周遭無其他建築物，縱深長度小於 10 m 之貫流通風量； K 為折減係數。所有的折減係數 $0 \leq K \leq 1$ 。

風向效應之折減係數與風向攻角有關，當風向角 $\theta \leq 80^\circ$ ，風向效應之折減係數可採用餘弦定律(Cosine law)來計算：

$$K_d = \cos\theta \quad (2-52)$$

當風向角 $\theta > 80^\circ$ ，屬於風切通風，採用式(2-23)或(2-24)計算通風量(Chu et al., 2011)。

建築物外牆開口上裝設百葉窗、紗窗、外推窗(推射窗)等裝置會降低通風量，其折減係數 K_o 如下表所列：

表 2-4 紗網窗、百葉窗、外推窗之折減係數

開口裝置	流量係數 C_d	折減係數 K_o
無	0.65	1.0
紗窗	0.50	0.77
百頁窗	0.60	0.92
外推窗	0.20	0.31

資料來源：本研究團隊整理

當建築物內部縱深過長，會消耗氣流的動能，降低貫流通風量(Chu and Chiang, 2014)，建築物縱深之折減係數 K_L 為：

$$\begin{aligned}
 K_L &= 1.0 && \text{當縱深長度 } L < 10 \text{ m} \\
 K_L &= \left(\frac{L}{10}\right)^{-0.115} && \text{當縱深長度 } L \geq 10 \text{ m}
 \end{aligned} \quad (2-53)$$

台灣的住宅式建築物常有外推式陽台，經由落地窗連接到室內。當氣流吹入室內時，不透風式陽台圍牆會阻礙氣流，而造成流入室內的通風量變小。本研究採用 RNG k-epsilon 紊流模式模擬一棟矩形建築物，總高度 $H = 20 \text{ m}$ ，寬度和長度皆為 $L = 10 \text{ m}$ ，最高樓層室內無隔間，內部高度 4 m 。在迎、背風面各有一個落地窗，落地窗斷面積為 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ ，落地窗外有一外推式陽台、陽台寬度 2.0 m ，陽台有不透風之水泥圍牆，高度為 1.0 m 。開口高度處的室外風速 3.0 m/s ，風向正對落地窗。模擬結果如圖所示，且陽台之水泥圍牆會造成通風量變成 $Q = 4.28 \text{ m}^3/\text{s}$ ，與無陽台建築的貫流通風量 $Q = 6.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 比較發現：不透風之水泥圍牆的折減係數 $K_b = 0.67$ 。當陽

台的圍牆是孔隙率很高的欄杆時，可視同陽台無遮蔽效應，折減係數 $K_b = 1.0$ 。故折減係數視欄杆的孔隙率而定，其範圍應為 $0 \leq K \leq 1$ 。

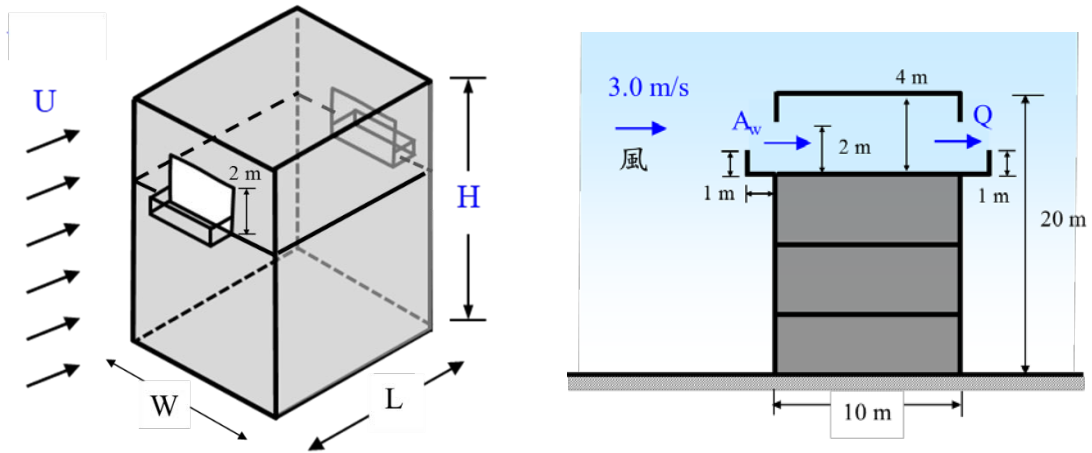


圖 2-20 建築物外推式陽台對落地窗風壓通風影響之示意圖

資料來源：本研究團隊整理

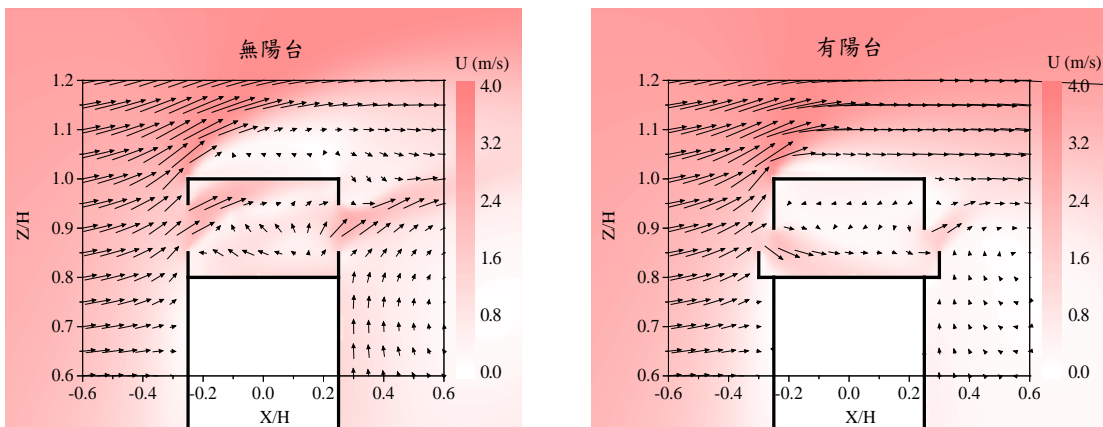


圖 2-21 建築物外推式陽台中心平面上的風速向量圖

資料來源：本研究團隊整理

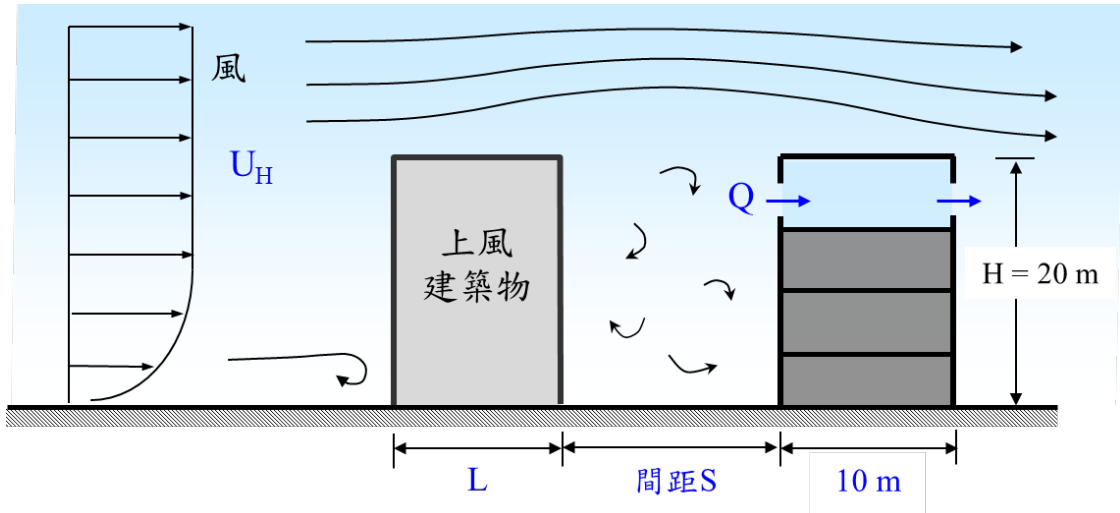


圖 2-22 相鄰建築物影響下風建築物風壓通風之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

相鄰建築物對風壓通風的影響亦可用折減係數來量化，折減係數 K_s 與相鄰建築物的高度、寬度、通風口位置及鄰近建築物之間距離有關。本研究用 RNG k-epsilon 紊流模式模擬兩棟建築物的相同高度 $H = 20\text{ m}$ ，相同長度 $L = 10\text{ m}$ ，相同寬度 $W = 10\text{ m}$ ，下風建築物在上風建築物的正後方，室內無隔間之貫流通風量。圖中符號為 CFD 模擬結果，最適曲線可用於預測不同間距下遮蔽效應之折減係數：

$$K_s = A - \exp\left(-0.64 \frac{S}{H}\right) \quad (2-54)$$

係數 A 與開口高度有關。當開口高度在 $z/H = 0.75$ ，係數 $A = 1$ ；開口在 $z/H = 0.50$ ，係數 $A = 0.95$ ；開口在 $z/H = 0.25$ ，係數 $A = 0.90$ 。因此，兩棟建築物之間距離 $S = H$ ，通風量的折減係數 $K_s = 0.47$ ，貫流通風量減半；當兩棟建築物之間距離 $S = 5H$ ，通風量的折減係數 $K_s = 0.96$ ，亦即前方建築物對下風建築物的貫流通風的影響幾乎可以忽略。當樓層愈低，風壓通風受到上風建築物的影響愈大，譬如開口在 $z/H = 0.25$ ，在相同的間距 $S = H$ ，折減係數 $K_s = 0.37$ ，貫流通風量會小於高樓層 ($z/H = 0.75$) 通風量。不同高度、寬度建築物之遮蔽效應的折減係數已可用 CFD 模式計算而得。

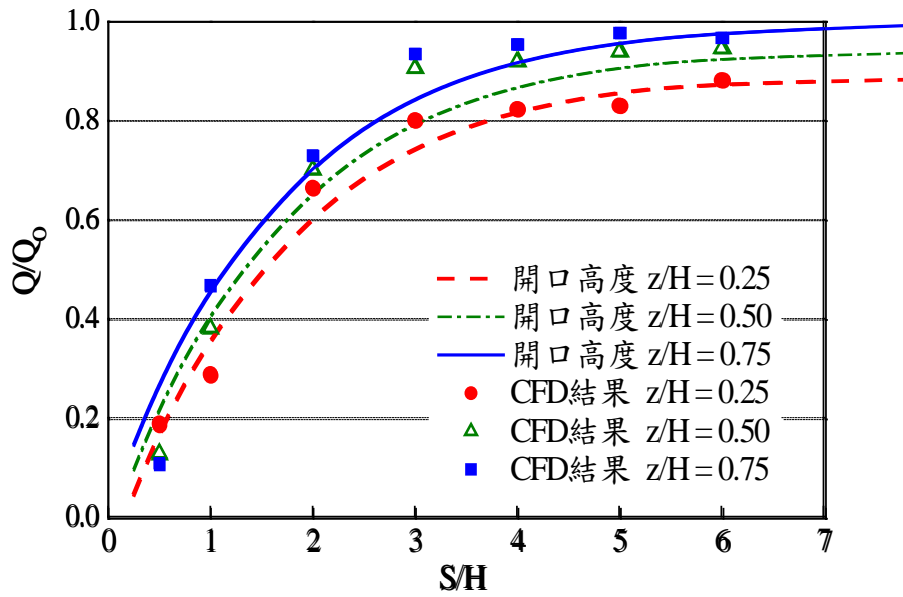


圖 2-23 相鄰建築物遮蔽效應之折減係數

資料來源：本研究團隊整理與繪製

當建築物迎風面有數個開口，可採用面積比例法計算各個開口的通風量：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{wi}}{\sum C_{di} A_{wi}} \sum Q_{\text{model}} \quad (2-55)$$

下標*i*代表第*i*個開口，*w*代表迎風面(windward)，*C_d*為開口的流量係數。亦即迎風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個迎風面開口；同樣地，背風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個背風面開口：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{Li}}{\sum C_{di} A_{Li}} \sum Q_{\text{model}} \quad (2-56)$$

下標*L*代表背風面(Leeward)。

影響建築物自然通風量的最主要因素為室外風速、風向以及建築物對外的開口面積和位置，因此必須考慮建築基地的平均風速和盛行風向來計算自然通風量。但通風量為進入室內的空氣體積流量，並未考慮室內體積。相同的通風量，對小型的辦公室、會議室是足夠的，但對大型的演講廳、音樂廳可能不夠。因此本研究建議採用自然通風狀況下建築物的小時換氣率 ACH 來評估其自然通風之良窳：

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (2-57)$$

式中V為室內體積。當一棟建築物的室內氣溫高於室外氣溫時，且換氣率ACH愈大，則室內氣溫被室外冷空氣置換而降溫的速度愈快。譬如，建築物的小時換氣率ACH = 6 hr⁻¹，亦即一小時內，室內空氣置換6次，大約10分鐘室內空氣被置換一次，室內氣溫會變成和室外氣溫相同。

一棟建築物各區域的通風量、室內體積各異，因此不同樓層、不同房間會有不同的換氣率。本手冊建議採用自然通風狀況下建築物內部各區域的平均換氣率ACH來做為整棟建築物自然通風之量化指標：

$$\overline{ACH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{V_i} \quad (2-58)$$

式中n為建築物內房間(區塊)的總數，Q為各區塊的通風量，V為各區塊之室內體積。

建築物自然通風的評估步驟如下：

- Step 1. 蒐集最靠近基地之氣象站的年平均風速與盛行風向(發生機率最大之風向)。
- Step 2. 決定建築物之座向與盛行風向之間夾角、建築物外牆上和內部開口面積與位置。
- Step 3. 由建築物各樓層的平面圖決定各區塊之通風屬於貫流通風或單側通風。
- Step 4. 由建築物各樓層的室外風速與在外牆上開口面積，計算建築物各區塊的自然通風量Q與換氣率ACH。
- Step 5. 計算整棟建築物的平均換氣率，用此評估自然通風之良窳。

建築物自然通風量的計算公式依建築物的形式、開口位置、室內有無隔間而有所不同，下一章利用建築案例說明不同狀況下建築物自然通風量及換氣率的計算方式。

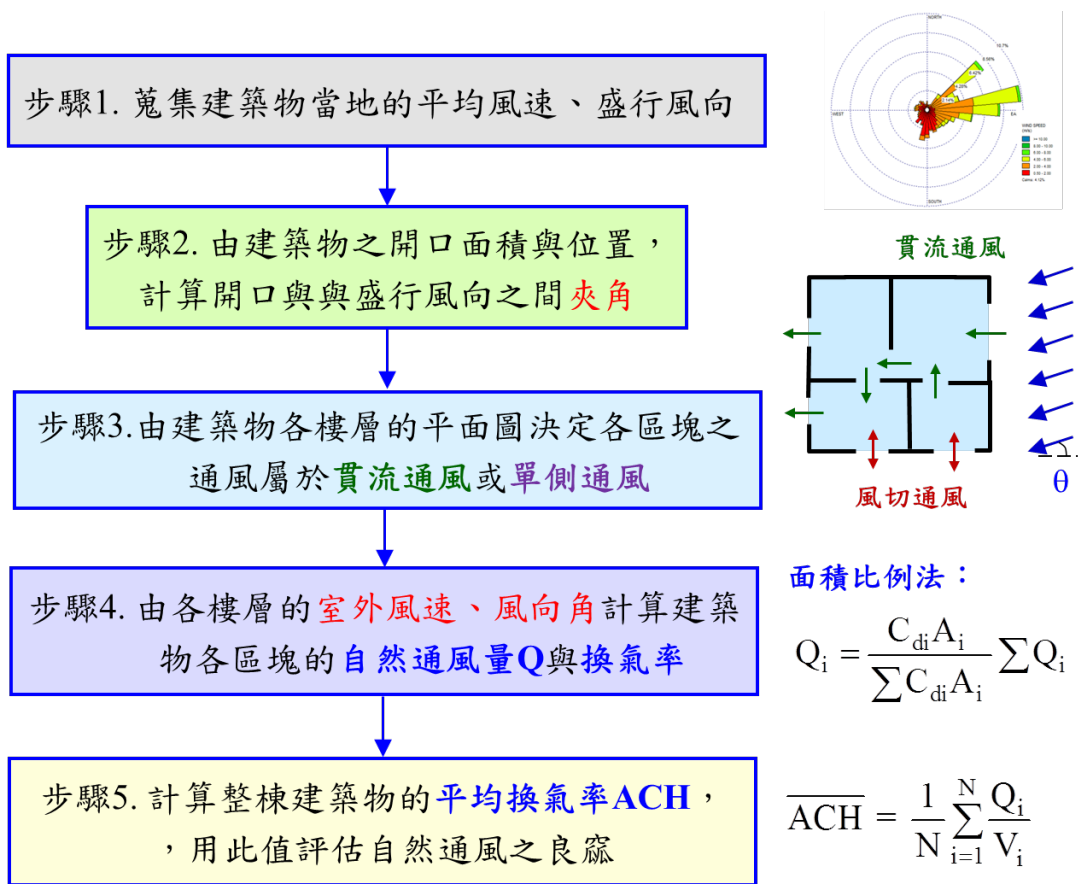


圖 2-24 建築物自然通風計算之流程圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第三章 自然通風潛勢

第一節 建築物的熱平衡

建築物內部的氣溫是會太陽輻射、通風量、室內熱源而變。假設建築物內部的氣溫是均勻分佈的，可用以下的熱平衡方程式來描述：

$$(\rho_a C_p V + C_{pm} M) \frac{dT_i}{dt} = \rho_a C_p Q T_a - \rho_a C_p Q T_i + A_f F + A_w k_w (T_a - T_i) \quad (3-1)$$

式中V為室內體積， ρ 為空氣密度， C_p 為空氣的比熱， T_i 和 T_a 為分別為室內、室外氣溫， $C_{pm}M$ 為室內傢俱的熱容量(heat capacity)， Q 為通風量， A_f 為樓地板面積， A_w 為建築物外殼面積， k_w 為外殼的熱傳係數， F 為室內熱得量(Heat gain, 熱源強度)，包括由窗戶照入室內的太陽輻射量、燈具、人員、電器、機械、鍋爐設施等單位面積的熱通量。在室溫(25°C)的狀況下，空氣密度 $\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3$ ，空氣的定壓比熱 $C_p = 1006 \text{ J/kg/K}$ ，亦即在一個標準大氣壓力狀況下，將1.0 kg的空氣加熱1 °C (= 1 °K)需要的熱量為1006 J。此外，當室內氣溫改變時，室內傢俱、物品、牆面會經由輻射與熱傳導吸收或釋放一部分的熱量，讓室內傢俱和空氣達到相同的溫度。傢俱、牆面的熱容(比熱)、熱傳係數因其材質而有所不同，可查表得知。

一棟建築物內部的熱源可以依據室內的燈具、人員數量、電器設備來估算，但太陽輻射量會隨季節、日夜而變，外殼所接受的淨輻射量(Net radiation)亦會隨建築物座向、是否有遮陽、外牆顏色和熱傳係數而定，可以用建築能源模式EnergyPlus、eQuest等軟體加以估算。台灣的建築節能法規採用平均太陽輻射量(Average Window Solar Gain, AWSG)來估算由窗戶進入室內的輻射量：

$$AWSG = \frac{\sum_i IH_i \cdot K_i \cdot \eta_i \cdot fv_i \cdot A_i}{\sum_i A_i} \quad (3-2)$$

其中 IH_i 為太陽輻射時數， K_i 為窗戶的外遮陽修正係數， η_i 為窗戶玻璃的透射率， fv_i 為窗戶的通風修正係數， A_i 為窗戶面積。當一棟建築物的AWSG值愈小，表示由窗戶進入室內的輻射量愈小，則冷卻降溫的需求愈低。但黃瑞隆(2013)的研究指出此式的分母為建築物的總開窗面積，非總外牆面積，無法真實地反映建築物的自然通風對於降低室內溫度的效應。

不論太陽輻射、室內熱源為何，只要室外氣溫低於室內氣溫，自然通風皆可降低室內氣溫。舉例而言，以一棟矩形透天建築物(高度20 m，寬度10 m，長度10 m)為

例，居室樓層高度4.0 m，室內體積400 m³。在迎、背風面開口面積皆為 $A_1 = A_2 = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，風向正對開口(角度 $\theta = 0^\circ$)的貫流通風量 $Q = 1.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 。若室內初始氣溫30°C，室外氣溫25°C，假設室內熱源強度為 $F = 20 \text{ W/m}^2$ 。

圖3-1比較Case 1 (通風量 $Q = 1.57 \text{ m}^3/\text{s}$)與Case 2 (通風量 $Q = 15.7 \text{ m}^3/\text{s}$)的室內溫度變化，由此可看出：在自然通風狀況下，室內氣溫由初始值 $T_i = 30^\circ\text{C}$ 逐漸降成與室外氣溫 $T_a = 25^\circ\text{C}$ 相同；且因為Case 2通風量 Q 和換氣率ACH皆較大，室內氣溫下降的速率較Case 1來得快。圖3-2比較室外氣溫 $T_a = 25^\circ\text{C}$ (Case 2)和 $T_a = 22^\circ\text{C}$ (Case 3)的狀況下，室內氣溫由初始值 $T_i = 30^\circ\text{C}$ 隨時間的變化。因為通風量 Q 相同，換氣率 $\text{ACH} = 28.2 \text{ hr}^{-1}$ ，案例2和案例3的室內氣溫皆大約在5分鐘之內，便下降至室外氣溫 T_a 相同。

表 3-1 自然通風降溫案例之參數

參數	符號	Case 1	Case 2	Case 3
室內體積	$V \text{ (m}^3\text{)}$	400	400	400
迎風面開口面積	$A_1 \text{ (m}^2\text{)}$	1	10	1
屋頂開口面積	$A_2 \text{ (m}^2\text{)}$	1	10	1
樓地板面積	$A_f \text{ (m}^2\text{)}$	100	100	100
外牆總面積	$A_w \text{ (m}^2\text{)}$	900	900	900
外牆熱傳係數	$k_w \text{ (W m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$	2.5	2.5	2.5
室內熱源強度	$F \text{ (W/m}^2\text{)}$	20	20	20
室外氣溫	$T_a \text{ (}^\circ\text{C)}$	25	25	22
室內初始氣溫	$T_i \text{ (}^\circ\text{C)}$	30	30	30
室外風速	$U \text{ (m/s)}$	3.0	3.0	3.0
通風量	$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	1.57	15.66	15.66
換氣率	$\text{ACH} \text{ (hr}^{-1}\text{)}$	2.82	28.2	28.2

資料來源：本計畫研究數據整理

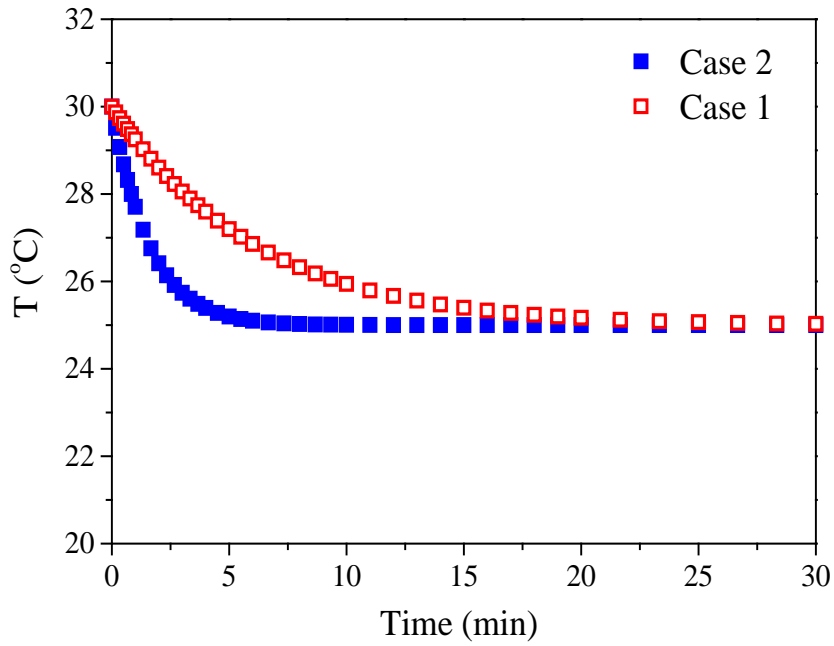


圖 3-1 案例 1 和案例 2 的室內降溫效果比較圖

資料來源：本計畫實驗數據整理，本計畫研究人員繪製

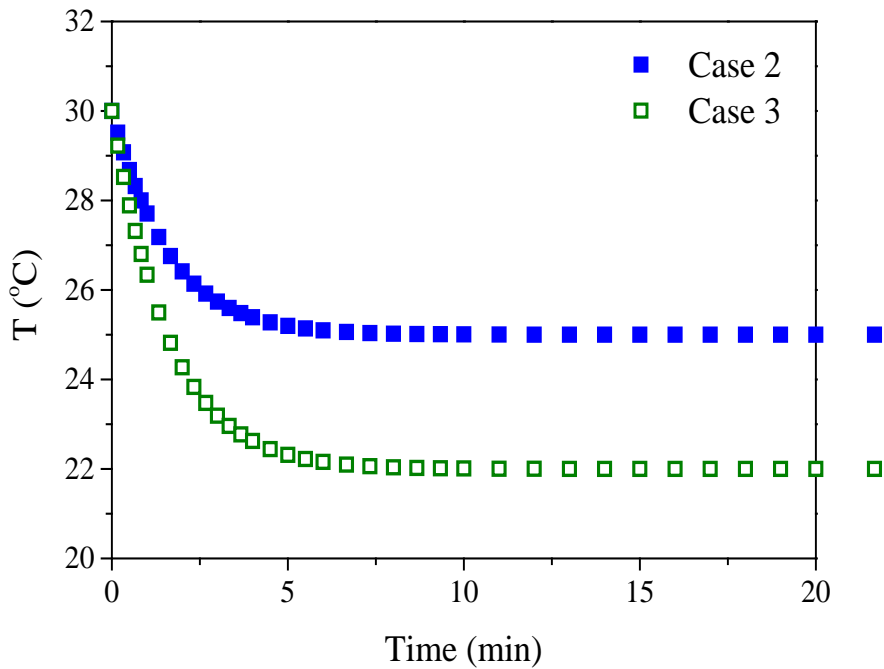


圖 3-2 案例 2 和案例 3 的室內降溫效果比較圖

資料來源：本計畫實驗數據整理，本計畫研究人員繪製

若建築物不採用自然通風，使用冷氣空調想達到與相同的降溫效果，假設冷氣無洩漏，不考慮通風管線的能量損失，且不計室內傢俱、牆面所吸收的熱量，只計算室內氣溫的變化，便可估算冷氣所耗費的電量：

$$E = \frac{\rho C_p V \Delta T}{\eta} \quad (3-3)$$

式中 η 為冷氣空調的運轉效率係數， ΔT 為使用冷氣前後的溫度差異。

以一棟透天建築物(高度20 m，寬度10 m，長度10 m)為例，假設空調的效率係數 $\eta = 50\%$ ，每天開空調的時間8.0 hr，室內氣溫由30°C降至25°C，溫差 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ ，可得一天冷氣所耗的耗電量54度(kW-hr)，一個月所耗費的電力為1600度(kW-hr)。以一度電2.5元台幣計算，一個月冷氣所耗電費大約為4000元。換言之，建築物若能有效利用自然通風，減少空調的使用時間，可降低建築物所耗之電力。

當建築物採用自然通風時，室內風速不宜太低或太高，不流動的室內空氣又讓人覺得悶熱；適當的風速可帶走人體上的熱氣與蒸發汗水，讓人有涼爽的感覺；但過高的風速直接吹到人體會有不舒服之感，或會吹亂桌面的紙張。丹麥學者Fanger & Christenesn (1987)和Fanger et al., (1988)在當地的氣溫狀況下，調查丹麥民眾受風吹之滿意程度，其測試之室內風速範圍0.05 ~ 0.40 m/s，紊流強度(風速擾動之均方根/平均風速) T_u 介於10% ~ 70%之間。依據其問卷調查結果，他們結合平均風速、紊流強度和氣溫，建議一個室內風擊的不滿意指標(Draft rate, DR)：

$$DR = \left[(34 - T_a)(V - 0.05)^{0.62} \right] (0.37V \cdot T_u + 3.14) \quad (3-4)$$

式中 V 為室內風速(m/s)， T_a 為室內氣溫($^\circ\text{C}$)。亦即室內風速 V 愈高，風擊的不滿意度愈大。但Fanger & Christenesn (1987)建議之風擊不滿意指標是針對室內冷風直接吹到人體會有冷颼颼不舒服的冷擊(Cold Draft)感覺。

在介於亞熱帶和熱帶的台灣，一般民眾習慣夏日吹風扇的涼爽感覺，可容許的室內平均風速和紊流強度應高於Fanger & Christenesn (1987)的建議值。且本研究實測發現：當家用風扇的低轉速下，風速為3.7 m/s，紙張並不會吹散。郭建源(2010)利用建研所的大型風洞進行台灣民眾受風之舒適度調查，在氣溫28度、風速3.3 m/s與紊流強度 T_u 約10%的狀況下，受調查的38人當中有27人覺得是舒適的，但利用(3-4)經驗式算出之風擊的不滿意指標 $DR = 190\%$ 。亦即台灣不應直接套用寒帶國家所訂之風擊指標。

除了風速之外，室內溫度與濕度也是影響建築物使用者舒適與否的重要因素。丹麥學者Fanger (1970)考慮乾球溫度、相對溼度、平均輻射溫度、空氣流動四個環境參數與衣著量、活動量兩個人體參數的影響，來預測建築物使用者對熱環境的感受程度，建議一個舒適度指標PMV (Predicted Mean Vote)的計算公式為：

$$\begin{aligned} PMV = & [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \cdot \{(M - W) - 3.05 \cdot [5.73 - 0.007(M - W) - P_v] \\ & - 0.42[(M - W) - 58.15] - 0.0173M(5.87 - P_v) - 0.0014M(34 - T_a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_a)\} \end{aligned} \quad (3-5)$$

式中M為人體的代謝熱量，W為人體做功損失之熱量，單位為(W/m²)，一般人在坐定狀況可設代謝熱量M = 60 W/m²，損失熱量W = 0；T_a為室內氣溫，T_r為(Mean Radiant Temperature, MRT)室內環境的平均輻射溫度，T_{cl}為衣著表面溫度，單位皆為°C；P_v為空氣中的水汽分壓(Vapor pressure)，單位為(kPa)。衣著溫度T_{cl}可以下式估算(ASHRAE-1997)：

$$\begin{aligned} T_{cl} = & 35.7 - 0.028(M - W) - 0.155I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \\ & [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)\} \end{aligned} \quad (3-6)$$

人體表面的對流熱傳速率h_c的單位為W/(m²K)，可以下式估算：

$$h_c = \text{Max} \left[2.38 |T_{cl} - T_a|^{0.25}, 12.1 \sqrt{V} \right] \quad (3-7)$$

式中V為室內風速(m/s)，T_a為室內氣溫(°C)。而f_{cl}可以下式估算(林憲德, 1994)：

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 0.20 I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0.50 clo \\ 1.05 + 0.10 I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.50 clo \end{cases} \quad (3-8)$$

式中I_{cl}為衣服隔熱率，單位為(m²K/W)，I_{cl}與人員衣著之表面積佔全身表面積之比率clo成正比(ASHRAE-1997)：

$$I_{cl} = 0.155 clo \quad (3-9)$$

衣著率clo介於0 ~ 1.0之間，夏季的短袖、短褲之衣著率clo = 0.5；西服套裝，衣著率clo = 1.0。舒適度指標PMV介於-3.0 ~ 3.0之間，PMV = -3.0，代表極冷；PMV = 3.0，代表極熱；PMV = 0，代表適中的舒適度。1984年國際標準組織(ISO)將此舒適度指標PMV訂為國際標準(ISO-7730)。此外，Fanger (1982)還提出一個預測不滿意百分比(Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)指標：

$$PPD = 1.0 - 0.95 \exp[-(0.0335 PMV^4 + 0.218 PMV^2)] \quad (3-10)$$

當 $PMV = 0$ 時， $PPD = 0.05$ ，表示即使室內環境為最佳熱舒適狀態，由於人們生理上差別，還有 5% 的人感到不滿意。當 PMV 介於 $-0.5 \sim 0.5$ 之間， $PPD < 0.10$ ，亦即不到 10% 的人感到不滿意。

但計算衣著溫度 T_{cl} 、對流熱傳速率 h_c 的公式為非線性聯立方程式，需要用數值模式以迭代的方式才能求出 T_{cl} 、 h_c 和 PMV 值，計算較複雜。且 PMV 、 PPD 經驗公式是調查歐美國家人士的感受數據而得，人體對溫度、溼度的舒適範圍因人而異，不同地區之民眾大多已習慣該地區之氣候環境，故不同地區的熱舒適標準應有所不同。

故 ASHRAE Standard 55-2004 採用溫濕度圖，訂出空調環境下舒適度的溫度濕度範圍，濕度上限是濕度比不宜超過 0.012 kg/kg 。操作氣溫的上、下限 (T_{\max} 、 T_{\min}) 則需依照實際的衣著率 clo 和衣服隔熱率 I_{cl} 以線性內差的方式計算：

$$T_{\max} = [(I_{cl} - 0.5clo)T_{\max, 1.0clo} + (1.0clo - I_{cl})T_{\max, 0.5clo}] / 0.5clo \quad (3-11)$$

$$T_{\min} = [(I_{cl} - 0.5clo)T_{\min, 1.0clo} + (1.0clo - I_{cl})T_{\min, 0.5clo}] / 0.5clo \quad (3-12)$$

ASHRAE Standard 55 建議自然通風建築物可採用熱適應模式，亦即民眾進出室內外溫度的適應程度與當時的氣溫有關，熱舒適最佳氣溫 T_{comf} 是室外月平均氣溫 \bar{T}_o 函數：

$$T_{\text{comf}} = 0.31\bar{T}_o + 17.8 \quad (3-13)$$

ASHRAE Standard 55 中，在氣溫 $T_{\text{comf}} \pm 2.5^\circ\text{C}$ 範圍，對應於 90% 可接受的熱舒適範圍。

以上皆為歐美國家的熱舒適標準，但會讓人不舒服的狀況，在歐美寒帶地區，主要是冬季時氣溫低、濕度低；而在台灣則主要是夏季的氣溫高、濕度高。譬如在歐洲和北美的夏季，在氣溫 28°C ，相對濕度約 40%~50% 的乾燥狀況下，身體流汗立即蒸發，汗水蒸發時會因蒸發潛熱造成體溫下降，會讓人覺得舒適。；但在台灣，同樣是氣溫 28°C ，相對濕度可達到 80%~90%，身體流汗，因為溼度高，蒸發緩慢，汗水停留在皮膚上會有不舒適之感。若室內有風扇或自然通風造成的微風，加速汗水蒸發，會讓人覺得涼爽舒適。故台灣不應該採用歐美國家的熱舒適標準。

第二節 自然通風之節能效率

當建築物採用自然通風可節約空調所耗之電力，所節約之電力與自然通風量、室內熱源有關，而影響自然通風量最主要因素為室外風速、風向以及建築物對外的開

口面積、位置與室內隔間。李怡萱 (2014)使用標準 $k - \varepsilon$ 模式計算一棟平房在七種不同室內隔間狀況下的風壓通風，分析其室內通風路徑和通風面積。依據其計算出的「可自然通風居室之樓地板面積」與「居室總樓地板面積」之比值，提出建築物的自然通風潛力 VP 的經驗計算式：

$$VP = \frac{\sum VA_i + \sum CA_i}{\sum A_i} \quad (3-14)$$

式中VP為全棟建築之自然通風潛力；VA_i為第i樓層的臨窗通風面積；CA_i為第i樓層的對流通風面積；A_i為第i層居室總面積。但此研究並未考慮室外風速、風向，亦未計算建築物的通風量、室內溫度或熱舒適性。且自然通風量與窗戶面積成正比，此VP值卻使用臨窗的樓地板面積。

內政部建築研究所2015年版的「綠建築評估手冊 - 基本型」的附錄三「建築物採光通風效益與通風空調節能評估規範」有說明建築物內部樓地板面積分為臨窗通風面積和對流通風面積，其「臨窗通風面積VA_i」為建築物內部因為開窗造成風力或上下溫差所引起的通風面積，規範中定義VA_i為可通風開口的左右邊界2.0 m以內與進深5.0 m以內之樓地板面積為臨窗通風面積。「對流通風面積CA_i」為通風口之間可連結形成通風路徑，也可增加通風的居室面積，對流通風的形成是經由某可通風開口連結至另一可通風開口，其通風面積之計算必先繪製通風路徑經過的範圍來決定，故必須先行計算臨窗通風面積後，再判斷通風開口之間是否可有效形成對流通風路徑。「居室面積A_i」為人員經常活動的空間為主要評估區域，也就是居室空間與梯廳走廊之部份，包含客廳、餐廳、廚房、書房、臥室等住戶私人空間，部分零碎的空間如走道則可併入客廳或餐廳。但像儲藏室、浴廁、機械間、避難梯間、不連接外氣的地下空間等則不需列入評估計算。

臨窗通風路徑與對流通風路徑有時會有重疊現象，因此需要先決定臨窗通風面積後，再繪製對流通風面積，以計算不重疊部分的臨窗通風面積 CA_i。對流通風面積成立條件可分為一般情況與有通風塔設計兩種情況：

1. 一般情況：

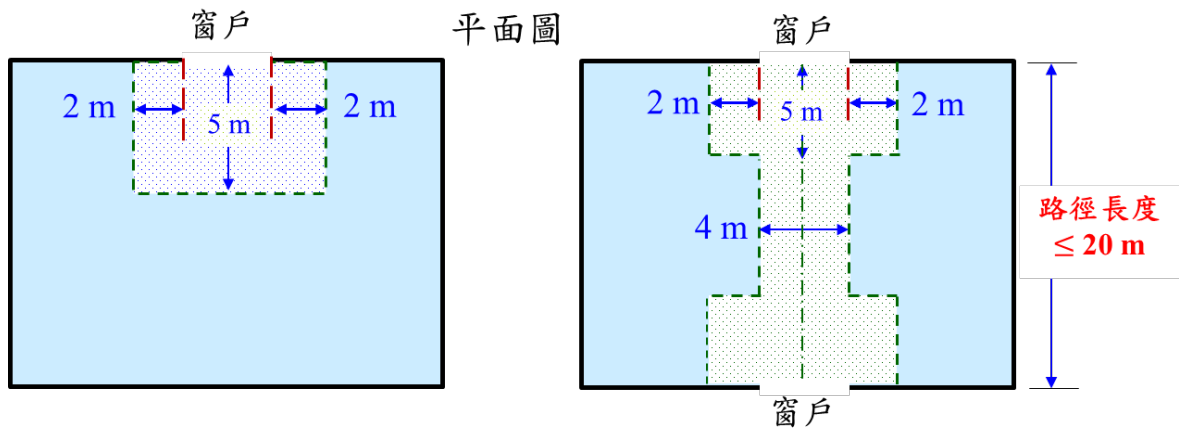


圖 3-3 臨窗通風面積與對流通風面積之示意圖

資料來源：2015 年版「綠建築評估手冊 BC」

- (1) 對流通風路徑所連結之開口必須同時為容易被開啟的可通風開口。
 - (2) 對流通風路徑一般以建築平面圖來作圖，從一可通風開口至另一可通風開口之通風路徑必須順暢，其路徑長度不得超過 20 m。另外其路徑轉彎的角度合計不得大於 90 度，以確保通風路徑直接且有效。
 - (3) 對流通風路徑的兩端以開口的中央為基準。
 - (4) 一個可通風開口只能有一條對流通風路徑，且此路徑必須通過非臨窗通風面積，且不同對流通風路徑間不得相交。
 - (5) 對流通風路徑必須確保不被門扇所關閉，其路徑必須完全處於隨時開放無阻的公共活動空間(包括住宅的客廳與廚房)，小型辦公室、寢室、衛浴、倉庫等私人空間或常關閉空間之密閉門扉處不能成為對流通風之路徑。
 - (6) 下列特殊設計狀況可允許被繪製為對流通風路徑經過之開口：
 - (a) 廚房門：直接視為經常開啟的門扉。
 - (b) 上有常開之氣窗、通風窗、通風口之門扉或隔間。
 - (c) 設有自由啟閉通風口設計之室內隔間門或大門。
 - (d) 室內隔間上方有留設通風空間者。
2. 有通風塔或天窗之情況：

在建築物高處設置可開啟之天窗、通風塔、屋頂通風器，經由室內空間、豎井、

樓梯間等豎向路徑，可與下方可開窗連線成為對流通風路徑。對流通風路徑必須確保不被門扇、檔板所關閉而隨時處於開放狀況，且全程最小通道面積必須確保 1.0 m^2 以上。經常關閉之密閉門扉與自動門不能成為對流通風之路徑，但隔間門扉上有面積 1.0 m^2 以上常開之開口、氣窗、百葉窗、可通風門則可被認定為對流通風路徑。通風塔、通風器之通風開窗面積以該風道最長部分之斷面積認定之。

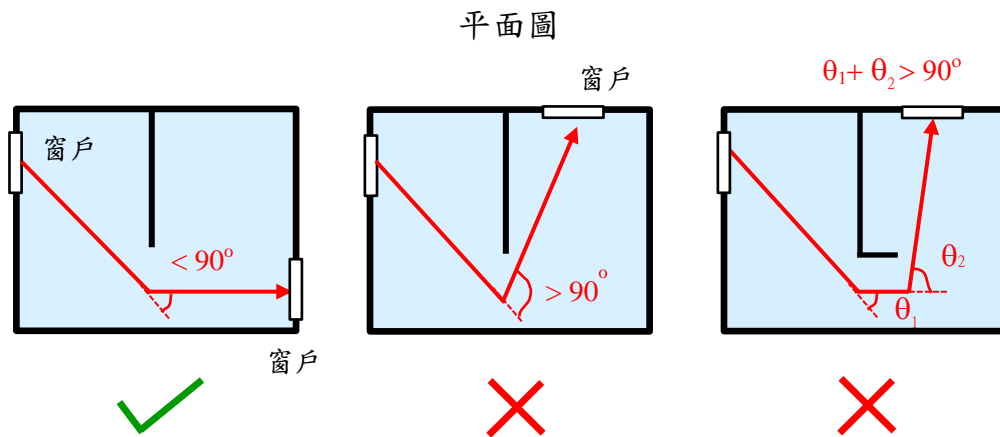


圖 3-4 對流通風路徑的轉角角度之和必須小於 90° 之示意圖

資料來源：2015 年版「綠建築評估手冊 BC」

對於有許多對外開口與內部隔間之建築物，以上計算對流通風面積之方法與通風路徑之規定過於複雜，可能會造成誤解而計算錯誤。內政部營建署於民國 108 年 12 月頒佈之「建築物節約能源設計技術規範」的附錄三「建築物自然通風空調節能評估法」與內政部建築研究所 2019 年版的「綠建築評估手冊 - 基本型」的附錄三「建築物採光通風效益與空調節能率評估原則」修改以上的自然通風潛力 VP 的定義，將單側通風窗 A_{vi} 與可對流窗 A_{cj} 二類開窗之開口面積經通風係數加權換算所構成，其計算公式如下所示：

$$VP = \frac{\sum A_{vi} + \sum 3A_{cj}}{\sum A_k} \quad (3-15)$$

式中單側通風窗面積 A_{vi} 為第 i 樓層的單側開窗而無法形成貫穿室內之對流通風路徑的可開窗面積，其形式包含各種開窗、落地窗、廚房陽台門等與外氣相接之可開口部位；可對流窗面積 A_{cj} 為雙向窗之間可形成貫穿室內對流通風路徑的可開窗面積，其開窗或開口面積之認定方式與上相同； A_k 為 k 層自然通風檢討面積，住宿類建築物

之通風檢討面積為住宿單元內的居室空間以及連結住宿單元之室內走道、梯廳與住宿單元室內聯絡樓梯，但不包括住宿單元以外的逃生梯間、管理室、娛樂室、地下室、停車場等公共空間。在此公式中通風係數 3.0 是認定可對流窗面積之自然通風效益為單側通風三倍之意。對流通風路徑以兩方開窗中心最短距離連線為認定基準，該連線可為直線或折線路徑，但折線路徑之轉彎的角度合計不得大於 90°，以確保通風路徑直接且有效，如圖 3-2。當建築物有多個對外開口時，僅認可三條不受干擾、且最短之對流路徑，且通風路徑不得交叉。

但 2019 版附錄三「建築物自然通風空調節能評估法」未說明不同建築物的自然通風量應該如何計算。此自然通風潛力 VP 的經驗式只計算建築物的開窗面積，並未考慮室外風速、風向對自然通風量的影響。譬如一棟建築物的同一樓層有四戶，四戶的開窗面積皆相同，兩戶在當地盛行風向的迎風面，窗戶正對盛行風向，自然通風效果極佳；另兩戶的窗戶都在盛行風向的背風面，風速微弱，風不易吹入室內，通風效果不佳。用規範算出四戶的 VP 值亦相同，無法真實地反映每一戶真實的自然通風狀況。

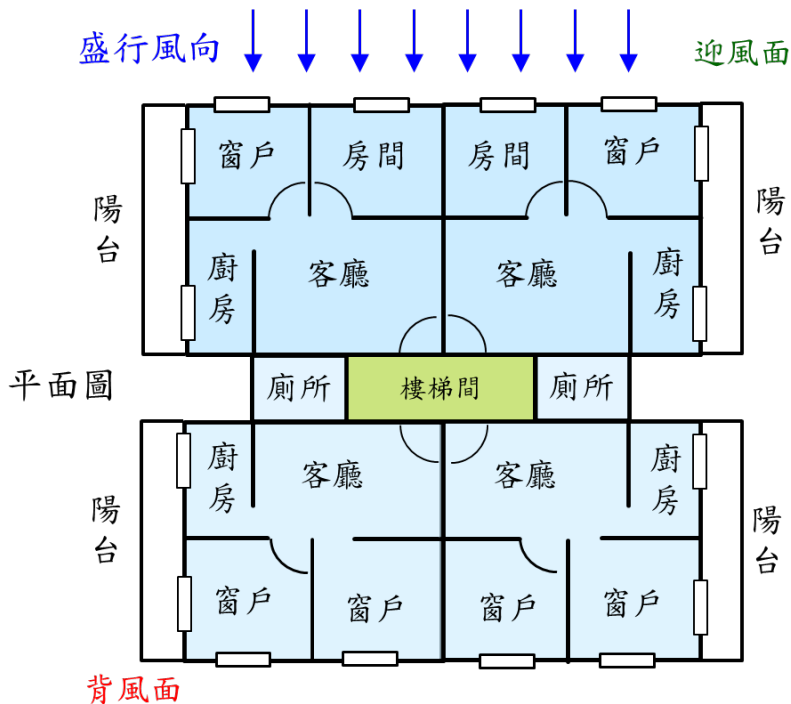


圖 3-5 建築物常見之內部隔間平面圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第三節 自然通風節能效率

附錄三「建築物採光通風效益與空調節能率評估原則」並訂出：當建築物的自然通風潛力 $VP \geq 0.05$ 時，可計算因為採用自然通風可減少的空調耗能折減率 V_{ac} (AC energy saving rate for ventilation design)，其前提是建築物採用間歇式空調，空調節能折減率 V_{ac} 之計算式如下：

當 $VP < 0.05$ 則令 $V_{ac} = 1.0$ ，亦即自然通風無節能效果

當 $VP \geq 0.05$ 住宿類建築的 V_{ac} ：

$$V_{ac} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{VP - 0.05}{0.15} \right) \quad \text{且} \quad V_{ac} \geq 0.80 \quad (3-16)$$

當 $VP \geq 0.05$ 非住宿類建築的 V_{ac} ：

$$V_{ac} = 0.9 - 0.1 \left(\frac{VP - 0.02}{0.13} \right) \quad \text{且} \quad V_{ac} \geq 0.80 \quad (3-17)$$

此二公式均有 V_{ac} 最小值必須大於等於0.8之規定，亦即該附錄認定自然通風之空調節能比例的上限值為20%之意。

成功大學建築研究所利用建築能源軟體e-Quest模式模擬十層樓規模之辦公建築在臺北、臺中、高雄三個氣候區之間歇型空調耗能狀況，模擬結果顯示：若設定室外氣溫 25°C 以下停止空調運轉，一年平均可停機日為106天，即在臺灣的辦公建築約有三個多月可停用冷氣空調，其平均自然通風空調節能率約為78.9~88.5%。自然通風空調節能率會受到建築體型與通風條件的影響。一般而言，住宿類建築物內部的熱得量(Heat gain)應低於辦公類建築，住宅內氣溫亦應低於辦公室內氣溫，若採用自然通風，一年可停機日應該大106天，亦即住宿類建築自然通風的真實節能比例有可能高於上限值20%。且因為 V_{ac} 值與 VP 值有密切關係，式(3-16)、(3-17)是否能正確評估自然通風對節約空調耗能的效果需要更進一步的研究。

影響建築物自然通風的最主要因素為室外風速、風向以及建築物對外的開口面積和位置，因此必須考慮建築基地的平均風速和盛行風向來計算自然通風量。但通風量為進入室內的空氣體積流量，並未考慮室內體積。相同的通風量，對小型的辦公室、會議室是足夠的，但對大型的演講廳、音樂廳可能不夠。因此本研究建議採用自然通風狀況下建築物的小時換氣率ACH來評估其自然通風之良窳：

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (3-18)$$

式中 V 為室內體積。當一棟建築物的室內氣溫高於室外氣溫時，且換氣率 ACH 愈大，則室內氣溫被室外冷空氣置換而降溫的速度愈快。譬如，建築物的小時換氣率 $ACH = 6 \text{ hr}^{-1}$ ，大約 10 分鐘室內氣溫會變成和室外氣溫相同。

一棟建築物各區域的通風量、室內體積各異，可能不同樓層、不同區域會有不同的換氣率。本計畫建議採用自然通風狀況下建築物的平均換氣率 ACH 來做為自然通風之量化指標：

$$\overline{ACH} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{V_i} \quad (3-19)$$

式中 N 為建築物內區塊(房間)的總數， Q 為各區塊的通風量， V 為各區塊之室內體積。

在充分使用自然通風的狀況下，室內氣溫仍高於人體舒適溫度時，大部分的建築物會開啟冷氣空調來降低室內溫度，讓室內達到一個舒適的狀況。冷房度時(Cooling degree hour, CDH)的定義為某地的時平均氣溫與一個基準溫度之間差異的累積值，其含意為當氣溫超過此基準溫度時，建築物需要使用冷氣空調降溫的總溫度值時數。若某地的氣溫愈高，冷房度時的值愈高，空調的耗電亦會愈高。

$$CDH = \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} [T_o(i, j) - T_b] \quad \text{when } T_o > T_b \quad (3-20)$$

冷房度日(Cooling degree day, CDD)則是某地的日平均氣溫與基準溫度之間差異的累積值。

本研究建議由完全不採用自然通風和採用間歇式自然通風的冷房度時(Cooling degree hour, CDH)來計算自然通風的節能效益：

$$CDH_{NV} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{24} [T_{NV}(i, j) - T_{comf}] \quad \text{when } T_{NV} > T_{comf} \quad (3-21)$$

其中 T_{NV} 為建築物採用自然通風的室內氣溫，當 $T_{NV} > T_{comf}$ 表示自然通風無法達到熱舒適的室內環境，必須開空調才能降低室內溫度。因此建築物採用自然通風的節能效率：

$$E_{ac} = \left(\frac{CDH_o - CDH_{NV}}{CDH_o} \right) \times 100\% \quad (3-22)$$

其中 CDH_o 為建築物完全不採用自然通風的冷房度時， CDH_{NV} 為建築物採用間歇式自然通風之後的冷房度時。

第四章 自然通風計算示範案例

建築物的自然通風的計算式依建築物的形式、開口位置、室內有無隔間而有所不同，本節利用案例說明不同狀況下建築物的自然通風的計算方式。

第一節 室內無隔間貫流通風

此案例為一棟矩形的建築物，高度 $H = 20 \text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10 \text{ m}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。本示範例僅計算最高居室樓層內外的風場，室內高度 4.0 m ，樓地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ ，室內無隔間。迎風面、背風面各有一個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，建築兩側外牆無開口，如圖4-1所示。迎風面、背風面兩開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (4-1)$$

再利用指數律將氣象站的年平均風速轉換成建築物開口高度處的風速：

$$U(z) = U_{\text{met}} \left(\frac{z}{H_{\text{met}}} \right)^{0.15} = 3.30 \left(\frac{18}{34.9} \right)^{0.15} = 3.0 \text{ m/s} \quad (4-2)$$

此處以台北市氣象站為例，該站的風速計離地面之高度 $H_{\text{met}} = 34.9 \text{ m}$ ，年平均風速 3.30 m/s ，指數 $\alpha = 0.15$ 。轉換成建築物開口高度在高度 18 m 處的室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 。假設風向垂直於開口($\theta = 0^\circ$)，室內外氣溫差異小於 5°C 。由風洞實驗的結果得知：迎風面開口處的風壓係數 $C_{p1} = (P_1 - P_o)/0.5\rho U^2 = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ 。帶入風壓貫流通風之計算模式，通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.84 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 6.26 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-3)$$

利用此法可計算其他樓層之貫流通風量，表4-3列舉在相同的開口面積 A 、流量係數之下，1樓、3樓、5樓的通風量結果。可看出：樓層愈高，室外風速愈大，通風量也愈大。當建築物迎風面和背風面開口皆裝上紗窗時，開口的流量係數改變，造成貫流通風量變小，結果整理於表4-1。可看出無裝置之流量係數最大，通風量最大，而外推窗的通風量最小。

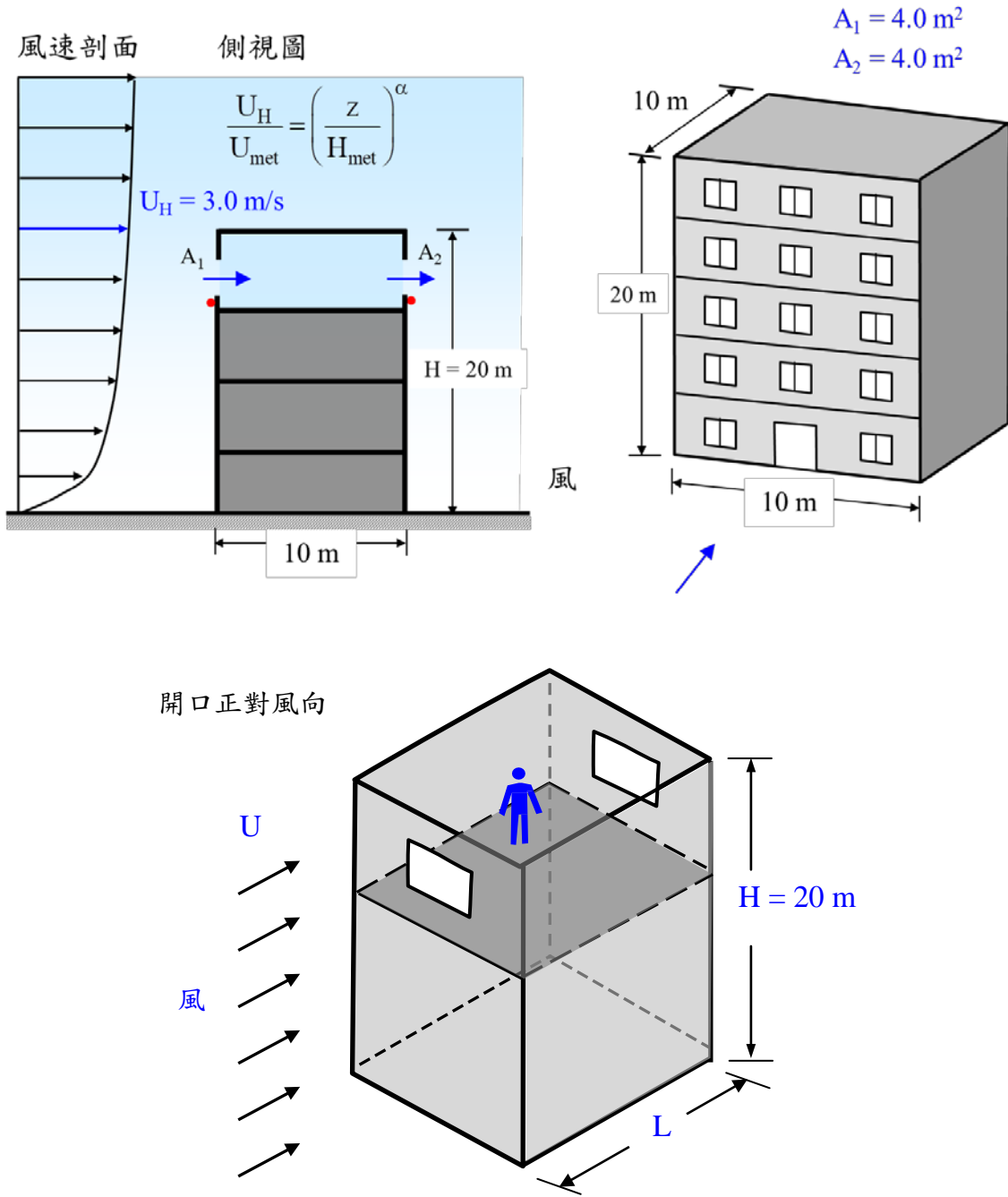


圖 4-1 對側開口貫流通風之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-1 不同樓層之貫流通風量

建築物樓層	5 樓	3 樓	1 樓
開口之高度 z	18 m	10 m	2.0 m
開口之風速 $U(z)$	3.0 m/s	2.75 m/s	2.16 m/s
迎風面開口面積 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積 A	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
有效開口面積 A^*	1.84 m ²	1.84 m ²	1.84 m ²
無因次通風量 Q^*	1.14	1.14	1.14
通風量 Q	6.26 m ³ /s	5.74 m ³ /s	4.51 m ³ /s
換氣率 ACH	56.3 hr ⁻¹	51.7 hr ⁻¹	40.6 hr ⁻¹

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-2 不同開口裝置之貫流通風量

建築物開口	無紗網、無百頁窗	紗窗	百頁窗	外推窗
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積 A_L	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口流量係數 C_d	0.65	0.50	0.60	0.20
有效開口面積 A^*	1.84 m ²	1.41 m ²	1.70 m ²	0.57 m ²
無因次通風量 Q^*	1.14	1.14	1.14	1.14
通風量 Q	6.26 m ³ /s	4.82 m ³ /s	5.76 m ³ /s	1.92 m ³ /s
換氣率 ACH	56.3 hr ⁻¹	43.4 hr ⁻¹	51.8 hr ⁻¹	17.3 hr ⁻¹
折減係數 K_o	1.0	0.77	0.92	0.31

資料來源：本研究團隊整理與繪製

此處的外推窗是當風向垂直於建築物外牆，而外推窗與牆面之間的夾角又小於90度時，氣流不易流入室內，外推窗通風效果不佳。若風向平行於外推窗或小於外推窗的角度，氣流容易流入室內，外推窗通風效果較佳。

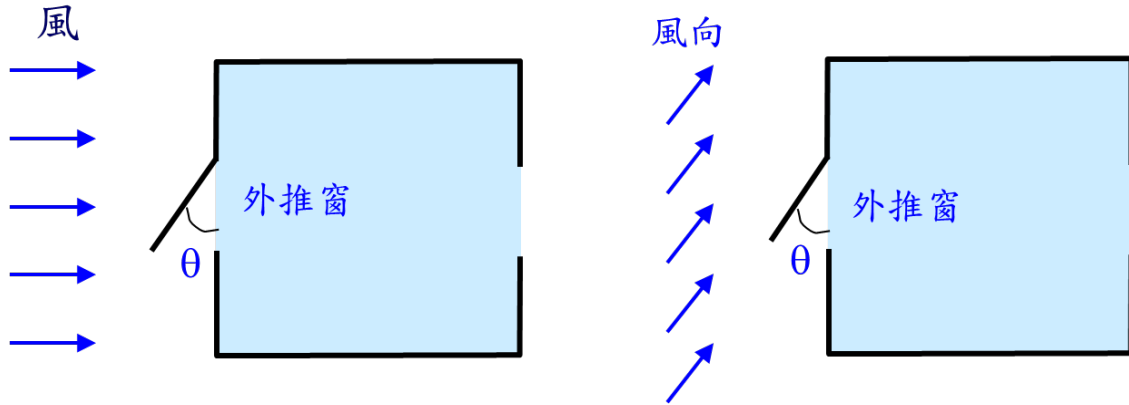


圖 4-2 外推窗與牆面夾角之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

為了瞭解建築物縱深對貫流通風的影響，Chu and Chiang, (2014)用CFD紊流數值模式計算一棟室內無隔間之矩形建築物的貫流通風，建築高度 $H = 4\text{ m}$ ，寬度為 $W = 10\text{ m}$ ，縱深的長度介於 $L = 5 \sim 40\text{ m}$ 。建築物對側外牆各有一個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，如圖4.3所示。開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 1.84\text{ m}^2$ 。風向垂直於開口($\theta = 0^\circ$)，室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。相同的風速、風向及建築物開口面積，僅改變建築物縱深。CFD計算得之迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.20$ 。研究結果顯示：短縱深建築物($L/H < 2.5$)的貫流通風量可用風壓通風模式(2-20)預測，但長縱深建築物內部的阻力會消耗氣流的動能，降低貫流通風量，必須用阻抗模式(Chu and Chiang, 2014)預測通風量。由此研究結果，亦可用折減係數計算長建築物貫流通風量。建築物縱深之折減係數 K_L 為：

$$K_L = 1.0 \quad \text{當縱深長度 } L < 10\text{ m} \quad (4-4)$$

$$K_L = \left(\frac{L}{10}\right)^{-0.115} \quad \text{當縱深長度 } L \geq 10\text{ m} \quad (4-5)$$

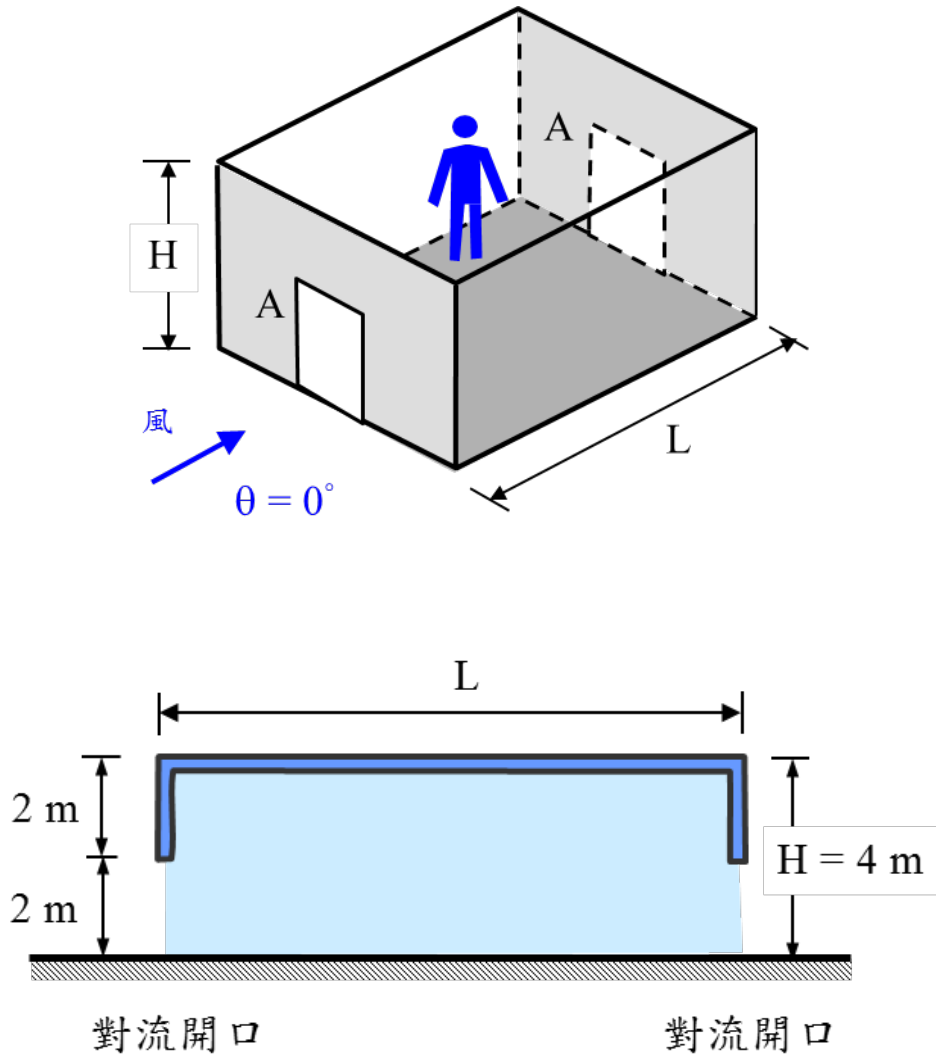


圖 4-3 建築物縱深對貫流通風之影響

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表4-3比較在不同長度建築物的貫流通風量。結果顯示：短縱深(L=短縱深(L=5 m)建築物的通風量最大，這是因為背風面風壓係數 $C_{pL} = -0.60$ ，小於其他縱深建築物的背風面風壓 $C_{pL} = -0.47$ (Chu and Chiang, 2014)，故無因次通風量 $Q^* = (C_{pw} - C_{pL})^{0.5} = 1.19$ 大於其他縱深建築物的無因次通風量 $Q^* = 1.14$ 。而在相同風速、風向、開口面積下，縱深 $L = 40$ m通風量約為縱深 $L = 10$ m通風量的85%，但因為建築物內部的體積隨著縱深 L 增加而增大，長縱深($L = 40$ m)建築物的換氣率ACH遠小於短縱深($L = 10$ m)的換氣率。

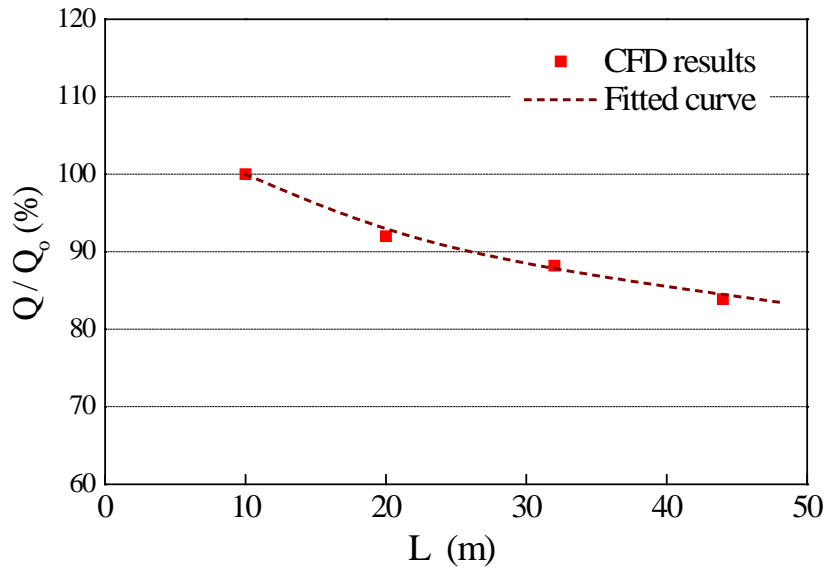


圖 4-4 貫流通風量隨建築物縱深之變化圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-3 不同長度建築物的貫流通風量

建築物長度	L = 5 m	L = 10 m	L = 20 m	L = 40 m
風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$
地板面積 A_f	50 m ²	100 m ²	200 m ²	400 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
開口面積 A_1	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口面積 A_2	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
無因次通風量 Q^*	1.19	1.14	1.14	1.14
折減係數 K_L	-	1.0	0.92	0.85
通風量 Q	6.56 m ³ /s	6.24 m ³ /s	5.74 m ³ /s	5.32 m ³ /s
換氣率 ACH	118 hr ⁻¹	56.2 hr ⁻¹	25.8 hr ⁻¹	12.0 hr ⁻¹

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第二節 不同風向之風壓通風示範例

此案例與之前的矩形建築物完全相同，建築物高度 $H = 20\text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。本示範例僅計算最高居室樓層，室內高度 4.0 m ，樓地板面積 $A_f = 100\text{ m}^2$ ，室內無隔間。迎風面、背風面各有一個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，建築兩側外牆無開口。開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 1.84\text{ m}^2$ 。當室內外氣溫差異小於 $5\text{ }^\circ\text{C}$ ，室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ 。如圖4-5所示，計算四個不同風向角($\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)下的自然通風。

先計算風向角 $\theta = 0^\circ$ 的風壓通風量 Q_0 ，迎風面開口的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ 。帶入式(2-20)計算風向角 $\theta = 0^\circ$ 之貫流通風量 $Q_0 = 6.26\text{ m}^3/\text{s}$ 。當風向角 $\theta = 30^\circ$ 和 60° 的風壓通風量可以用餘弦定律(Cosine law)來計算：

$$Q(\theta) = Q_0 \cos \theta \quad \text{when } \theta < 80^\circ \quad (4-6)$$

當風向角 $80^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$ ，風向幾乎平行於開口，屬於風切通風，用式(2-24)計算，通風量結果列於表4-4。

當建築物的開口無法完全正對當地的盛行風向，建築物的開口與風向的夾角介於 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 之間，通風量為風向角 $\theta = 0^\circ$ 之貫流通風量的71%。室外風速大時，自然通風量仍有不錯的效果。

當風向平行於開口(風向角 $80^\circ < \theta < 100^\circ$)，如圖4-7所示，建築物開口處的風切紊流驅使室內外空氣的交換，通風量可用式(2-23)或(2-24)預測。表4-5比較在相同的風向、風速、開口面積下，單側、雙側開口的風切通風量，可看出：雙側雙開口的通風量最大，單側單開口的風切通風量最小，大約為貫流通風量的5%，屬於通風不良的狀況。

表4-6為室內無隔間，不同風向下單側雙開口之通風量。當風向角 $\theta = 45^\circ$ ，通風量最大，這是因為兩個開口皆在迎風面，且風壓不對稱之壓差驅動氣流在兩開口間流動；當風向角 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ，兩個開口皆在背風面，風壓差異接近零，故通風量小。當風向角 $\theta = 180^\circ$ ，對稱的緣故，風壓差異為零，只有室外的紊流促使室內外的空氣交換。

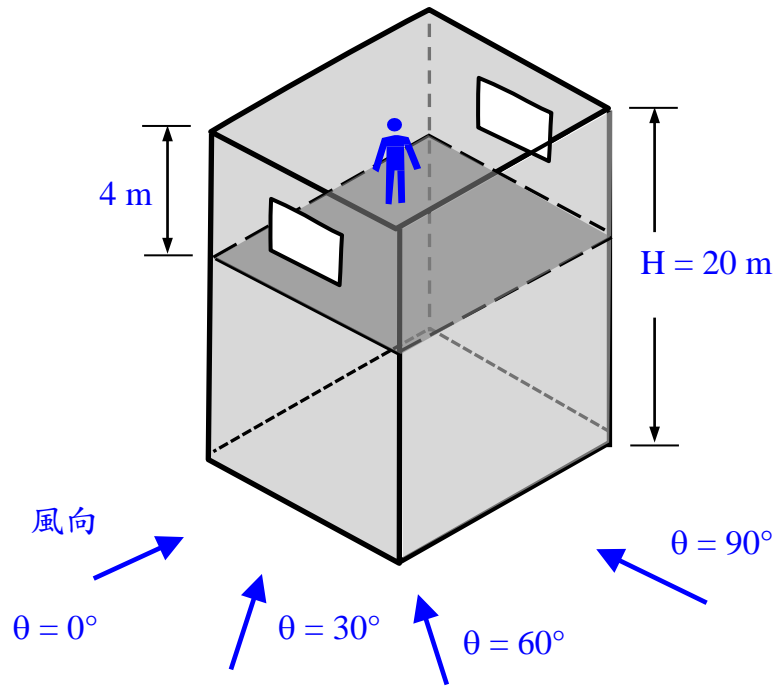


圖 4-5 不同風向下建築物風壓通風之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-4 不同風向角之雙側雙開口通風量

風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 90^\circ$
地板面積 A_f	100 m ²	100 m ²	100 m ²	100 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積 A_L	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口流量係數	0.65	0.65	0.65	0.65
有效開口面積 A^*	1.84 m ²	1.84 m ²	1.84 m ²	4.0 m ²
無因次通風量 Q^*	1.14	0.99	0.57	0.077
通風量 Q	6.26 m ³ /s	5.40 m ³ /s	3.12 m ³ /s	0.91 m ³ /s
換氣率 ACH	56.3 hr ⁻¹	48.7 hr ⁻¹	28.1 hr ⁻¹	8.2 hr ⁻¹

資料來源：本研究團隊整理與繪製

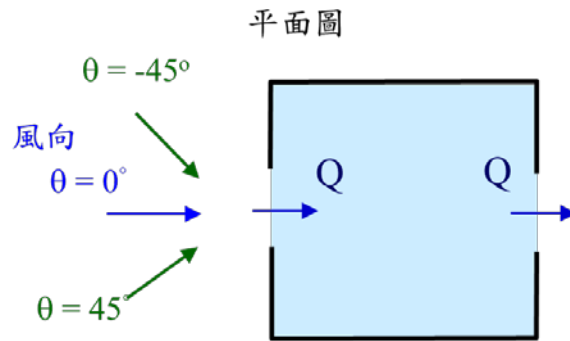


圖 4-6 建築物的開口與風向的夾角之示意圖

表 4-5 風向平行於建築物開口之通風量

開口形式	單側單開口		單側雙開口	雙側雙開口
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$
地板面積 A_f	100 m ²	100 m ²	100 m ²	100 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
開口面積 A_1	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口面積 A_2	0 m ²	0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
無因次通風量 Q^*	0.025	0.0175	0.089	0.077
通風量 Q	0.295 m ³ /s	0.21 m ³ /s	1.07 m ³ /s	0.91 m ³ /s
換氣率 ACH	2.7 hr ⁻¹	1.9 hr ⁻¹	9.6 hr ⁻¹	8.2 hr ⁻¹

資料來源：本研究團隊整理與繪製

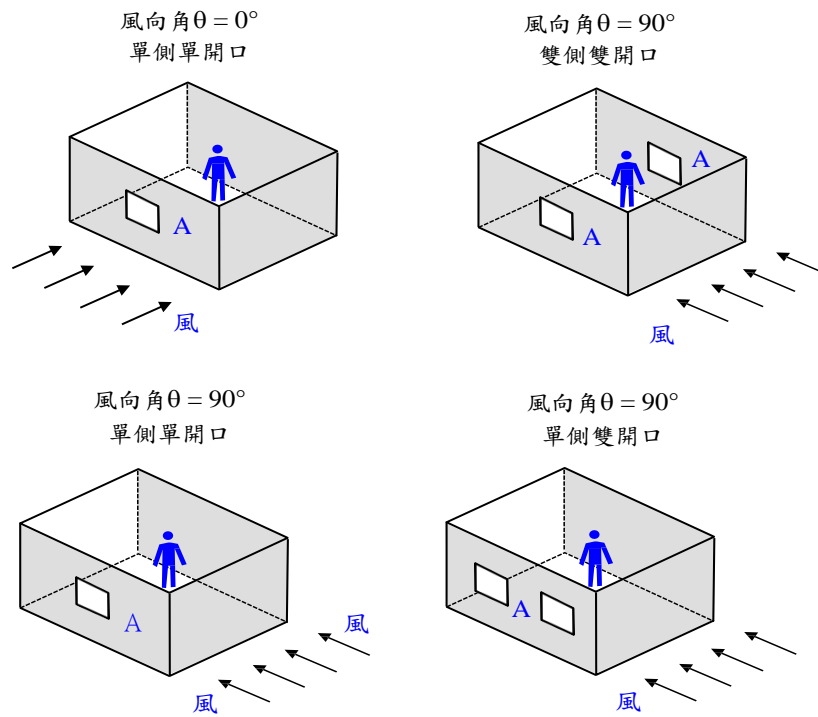


圖 4-7 風向平行於建築物開口之風壓通風

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-6 不同風向下單側雙開口室內無隔間之通風量

風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 180^\circ$
地板面積 A_f	100 m ²	100 m ²	100 m ²	100 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積 A_L	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
無因次通風量 Q^*	0.075	0.179	0.089	0.052
通風量 Q (m ³ /s)	0.885	2.11	1.05	0.61
換氣率 ACH (hr ⁻¹)	7.97	19.0	9.45	5.52

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第三節 單側雙開口之示範例

此案例和前節矩形建築物的尺寸、開口面積、室外風速完全相同，但最高樓層室內分隔成兩個房間之建築物。建築物總高度 $H = 20\text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，本研究僅計算最高居室樓層，室內高度 $h = 4.0\text{ m}$ ，在同一側外牆上有兩個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，開口無紗網、無百頁窗狀況下，室內有一牆將內部空間隔成相同大小的兩個房間，房間地板面積分別為 50 m^2 。周遭無其他影響風場之建築物，室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，當風向平行於開口 ($\theta = 90^\circ$)，如圖 4-8 所示，建築物開口處的風剪力驅使室內外空氣的交換，通風量可用圖 3.8 之實驗結果預測。表 4-7 比較在相同的風向、風速、開口面積，室內有隔間，不同風向下單側雙開口之通風量。當風向角 $\theta = 45^\circ$ ，單側雙開口的通風量最大，但仍小於室內無隔間之通風量。

表 4-7 的通風量結果顯示：當風向角 $\theta = 0^\circ$ 和 180° ，通風量皆很小。這是因為兩個開口對稱的緣故，風壓差異接近零，只有室外的紊流促使室內外的空氣交換。而風向角 $\theta = 45^\circ$ ，通風量最大，因為兩個開口皆在迎風面，因為風斜斜吹來的不對稱，導致風壓差異大。此案範例和前一案例比較可知：在相同室外風速、風向下，無室內隔間之建築物的自然通風量大於有隔間之通風量。

表 4-7 單側雙開口室內有隔間不同風向之風壓通風量

風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 180^\circ$
地板面積 A_f	100 m^2	100 m^2	100 m^2	100 m^2
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積 A_w	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2
背風面開口面積 A_L	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2
無因次通風量 Q^*	0.041	0.092	0.051	0.055
通風量 $Q\text{ (m}^3/\text{s)}$	0.484	1.086	0.60	0.65
換氣率 $\text{ACH (hr}^{-1}\text{)}$	4.36	9.77	5.42	5.84

資料來源：本研究團隊整理與繪製

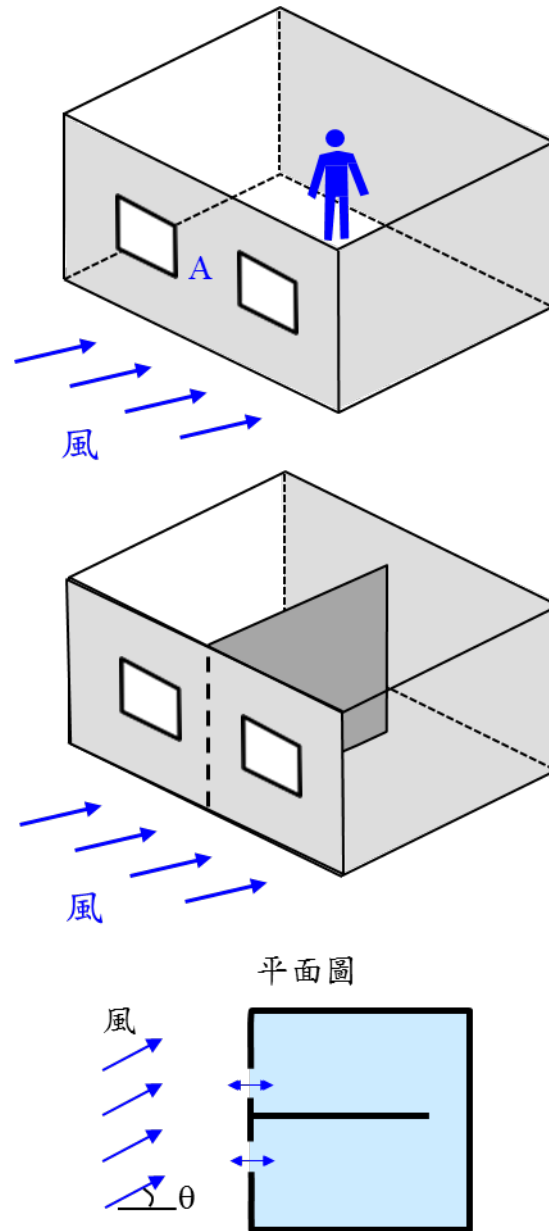


圖 4-8 單側雙開口建築物之風壓通風

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第四節 三側三開口風壓通風示範例

本案例探討室內隔間對通風路徑之影響，建築物高度 $H = 20\text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。本研究僅計算最高居室樓層，室內高度 4.0 m ，建築物的地板面積 100 m^2 。該樓層在迎風面、背風面及側面外牆上各有一個開口，開口面積 $A_1 = A_2 = A_3 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，開口位置和室內隔間共有五種不同的狀況，如圖4-9所示，開口無紗網、無百頁窗，流量係數皆為 $C_d = 0.65$ 。當室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，

迎風面開口處的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ ，將風壓係數帶入可求得無因次通風量 Q^* ：

$$Q^* = \frac{Q}{A^*U} = \left[[C_{p1} - C_{p2}] \right]^{1/2} = [0.82 + 0.47]^{1/2} = 1.136 \quad (4-7)$$

三個開口的有效開口面積 $A^* = 2.326 \text{ m}^2$ ，將室外風速帶入得通風量 $Q_{\text{model}} = 7.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ；兩個開口的有效開口面積 $A^* = 1.838 \text{ m}^2$ ，預測得之通風量 $Q_{\text{model}} = 6.26 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

此外，本研究利用k- ϵ RNG數值模式計算這五個案例的風壓通風量，計算域的長度為190 m，高度為100 m (5倍建築物高度)，寬度為80 m，計算網格採不均勻網格，網格總數為3,575,218，室內最小網格為0.2 m。預測得之貫流通風量 Q_{model} 列於表4-8，可看出CFD模擬得之通風量 Q_{CFD} 與式(2-20)預測之通風量 Q_{model} 結的誤差皆在6%之內，顯示本研究之風壓通風模式的正確性。此外，案例6-1的總通風量最大，這是因為其有效開口面積 A^* 最大，且室內無隔間之緣故。而案例6-2和案例6-3，因為室內隔間造成通風路徑轉彎角度大於90度，但其總通風量略小於案例6-1的總通風量。換言之，當通風路徑轉彎角度大於90度，貫流通風依然有效，且三個開口都是對流開口 A_c 。這和綠建築評估手冊附錄三「建築物自然通風空調節能評估法」通風路徑轉彎角度不得大於90度不同。案例6-4、案例6-5的通風量小，因為只有兩個開口，有效開口面積小，其通風量約為案例6-1的78%。

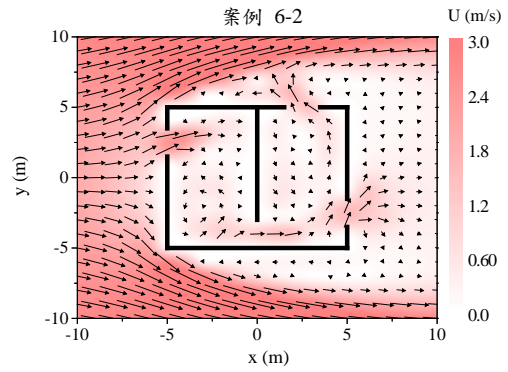
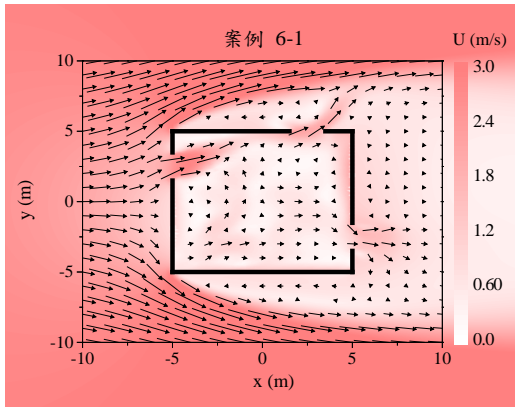
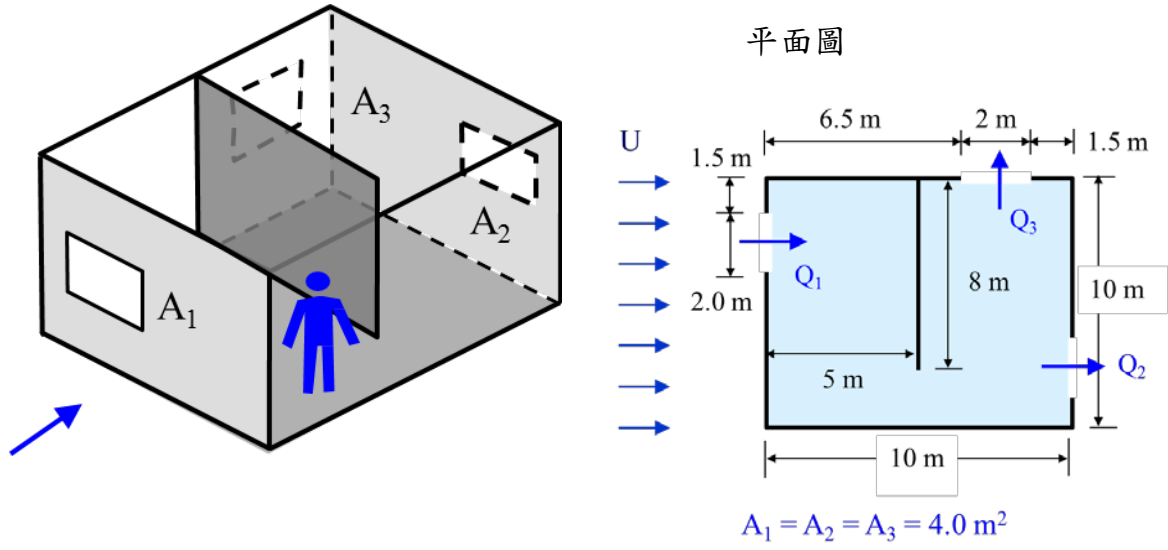


圖 4-9 三側三開口建築物(a)室內隔間及開口位置之示意圖；(b) CFD 模擬之室內外風速向量圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-8 案例 6 的風壓通風量

案例	Case 6-1	Case 6-2	Case 6-3	Case 6-4	Case 6-5
迎風面 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面 A_L	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	0	4.0 m ²
側面 A_s	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	0
Q^*	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
A^* (m ²)	2.326	2.326	2.326	1.838	1.838
Q_{model} (m ³ /s)	7.92	7.92	7.92	6.26	6.26
Q_{CFD} (m ³ /s)	7.78	7.45	7.74	6.07	6.36
Error	1.8%	5.9%	2.2%	3.0%	1.6%

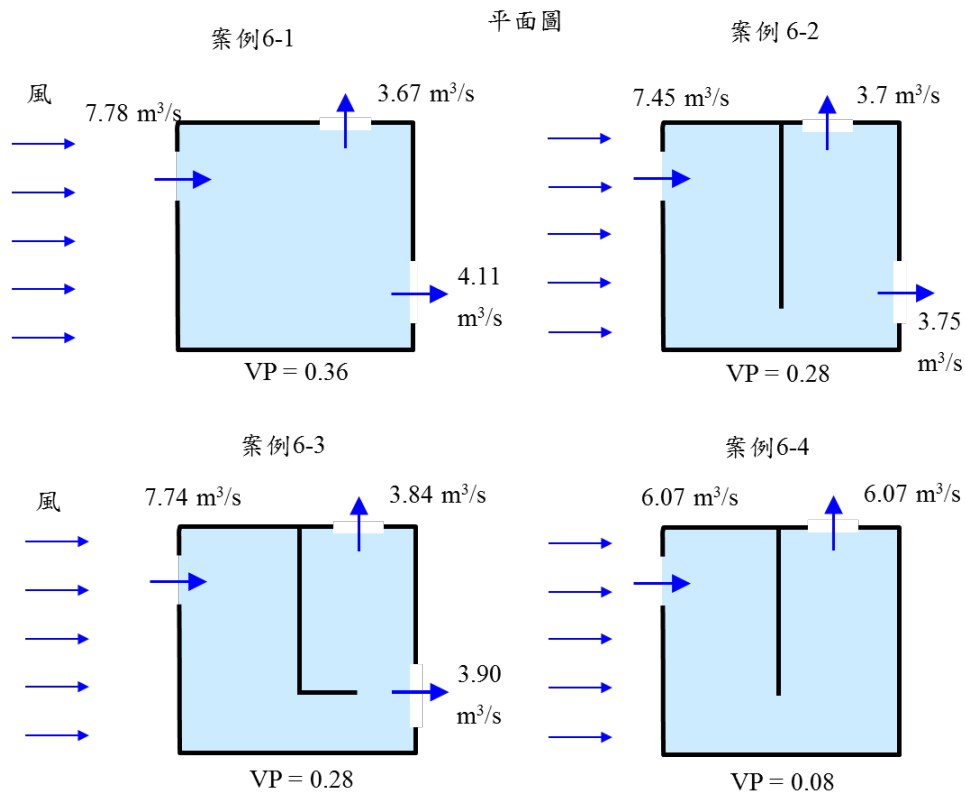


圖 4-10 三側三開口建築物之風壓通風量

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第五節 廠房之貫流通風示範例

此案例為一棟室內無隔間之單斜式屋頂三連棟廠房，如圖 4-11，周遭無其他影響風場之建築物，長度為 21.6 m，寬度為 20 m，屋頂最高點高度 4.8 m，最低點高度 3.0 m，建築物的地板面積 $A_f = 432 \text{ m}^2$ 。建築物迎風面、背風面各有兩個開口，低處開口面積 $A_w = A_L = 12 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ ，高處屋頂開口面積 $A_{r1} = A_{r2} = 12 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。由風洞實驗的結果知道：在風向角 $\theta = 0^\circ$ ，迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.26$ 。當風向角 $\theta = 180^\circ$ ，迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.34$ 。

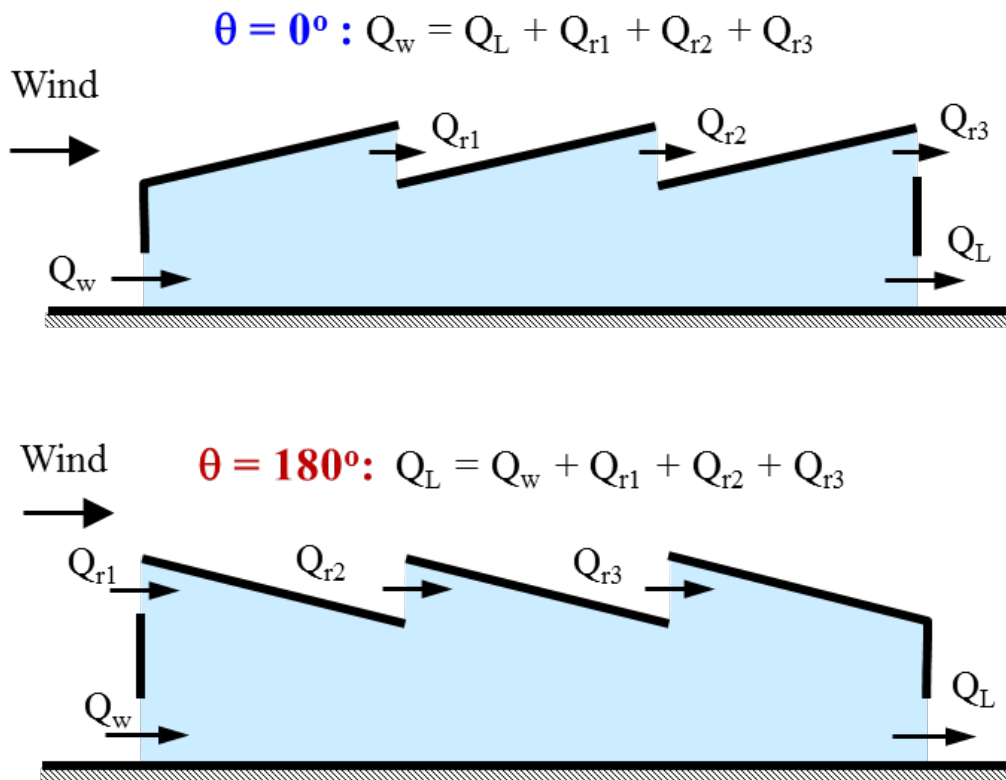


圖 4-11 單區間多開口廠房風壓通風之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-9 廠房之風壓通風量

風向角	風向 $\theta = 0^\circ$		風向 $\theta = 180^\circ$	
地板面積 A_f	432 m ²		432 m ²	
平均高度 h	3.9 m		3.9 m	
室內體積 V	1685 m ³		1685 m ³	
迎風面開口面積 A_w	19.2 m ²		19.2 m ²	
背風面開口面積 A_L	19.2 m ²		19.2 m ²	
無因次通風量 Q^*	0.99		1.03	
屋頂開口	關閉	開啟	關閉	開啟
屋頂開口面積 A_r	0	9.60 m ²	0	9.60 m ²
有效開口面積 A^*	8.83 m ²	11.59 m ²	8.83 m ²	11.59 m ²
通風量 Q (m ³ /s)	20.7 m ³ /s	27.3 m ³ /s	21.6 m ³ /s	28.3 m ³ /s
折減係數	0.915	0.915	0.915	0.915
通風量 Q (m ³ /s)	19.0 m ³ /s	24.9 m ³ /s	19.8 m ³ /s	25.9 m ³ /s
換氣率 ACH	40.6 hr ⁻¹	53.3 hr ⁻¹	42.2 hr ⁻¹	55.4 hr ⁻¹

資料來源：本研究團隊整理與繪製

開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。屋頂開口關閉狀況下，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 8.83 \text{ m}^2 \quad (4-8)$$

再利用指數律將氣象站平均風速轉換成建築物屋頂平均高度處的風速：

$$U(z) = U_{met} \left(\frac{z}{H_{met}} \right)^{0.15} = 3.30 \left(\frac{3.9}{34.9} \right)^{0.15} = 2.38 \text{ m/s} \quad (4-9)$$

此處以台北市氣象站的風速計高度 $H_{met} = 34.9 \text{ m}$ ，年平均風速 3.30 m/s ，指數 $\alpha = 0.15$ 。轉換成建築物屋頂平均高度 18 m 處的室外風速 $U = 2.38 \text{ m/s}$ 。當風向垂直於開口 ($\theta = 0^\circ$)，將風壓係數和有效開口面積帶入風壓通風模式，可得貫流通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 11.59 \cdot 2.38 \cdot [0.72 + 0.26]^{1/2} = 20.7 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-10)$$

屋頂開口開啟狀況下，有效開口面積 $A^* = 11.59 \text{ m}^2$ 。建築物的長度 $L = 21.6 \text{ m} > 10 \text{ m}$ ，縱深折減係數 K_L ：

$$K_L = \left(\frac{21.6}{10} \right)^{-0.115} = 0.915 \quad (4-11)$$

前方無其他建築物，故遮蔽效應的折減係數 $K_s = 1.0$ ；無陽台圍牆，折減係數 $K_b = 1.0$ 。故貫流通風量計算如下：

$$Q = K_d K_o K_b K_L K_s Q_o = 0.915 \cdot 20.7 = 19.0 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-12)$$

當風向角 $\theta = 180^\circ$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.34$ ，無因次通風量 Q^* ：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 8.83 \cdot 2.38 \cdot [0.72 + 0.34]^{1/2} = 28.3 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-13)$$

表4-9比較在風向 0° 和 180° 下，預測得之通風量 Q ，可以發現：屋頂開口在開啟的狀況下可增加通風量約30%；而風向角 $\theta = 180^\circ$ 的通風量大於風向角 $\theta = 0^\circ$ 的通風量。

第六節 住宅之風壓通風示範例

此案例為一棟住宅建築物，長度為 10 m ，寬度為 10 m ，室內高度 4 m ，建築物的地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ 。建築物面對風向有三個開口，開口面積 $A_{w1} = 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ， $A_{w2} = A_{w3} = 1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，背風面有兩個開口，開口面積 $A_{L1} = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ， $A_{L2} = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。周遭無其他影響風場之建築物。不考慮陽台圍牆對風場的影響，且窗戶為橫拉窗，無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 2.76 \text{ m}^2$ 。在屋頂高度處的風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，共有四個案例，計算各種狀況下的通風量。

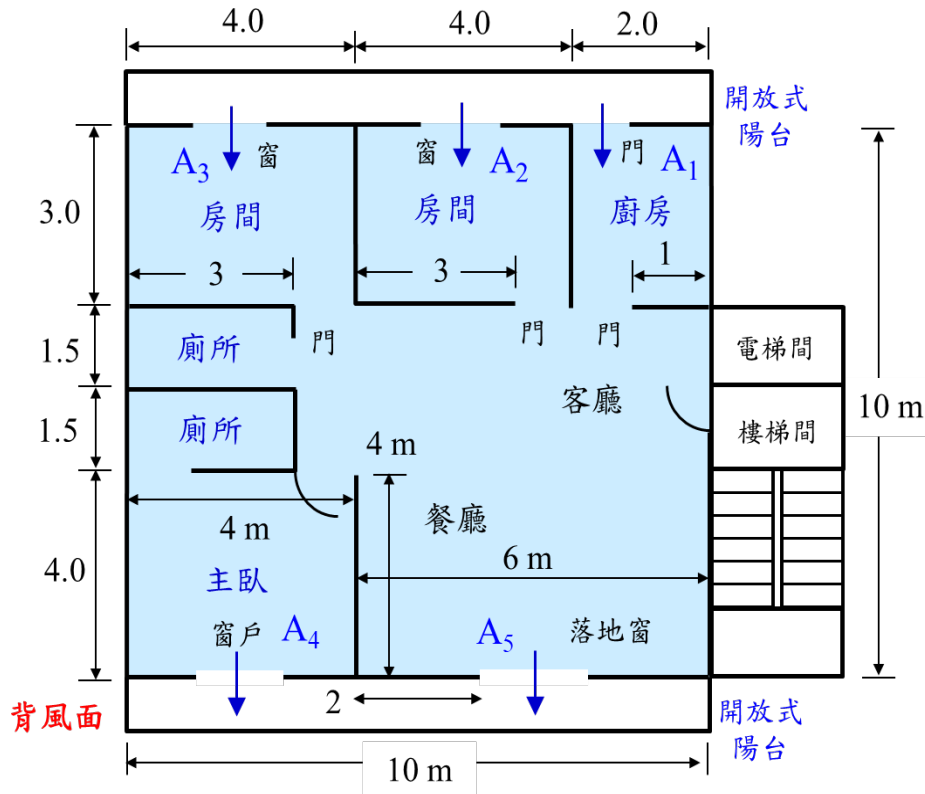


圖 4-12 住宅室內隔間之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

(1) 案例9-1：此案例為風向由北往南吹，室內外門窗皆開啟，屬於貫流通風，不考慮前後陽台對氣流的影響。將有效開口面積帶入風壓通風模式計算整戶的總通風量：

$$\sum Q = A^* U \left[C_{pw} - C_{pL} \right]^{1/2} = 2.76 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 9.40 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-14)$$

用模式計算得之總通風量 $\sum Q_{\text{model}} = 9.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ，十分接近用 RNG k-epsilon CFD 數值模式計算得之通風量 $\sum Q_{\text{CFD}} = 9.09 \text{ m}^3/\text{s}$ ，誤差 3.3%，顯示風壓通風模式的正確性頗佳。圖 4-13 為 CFD 模擬之風速向量圖，可看出氣流在室內流動時，通風路徑會分叉、匯合。利用面積比例法計算各個開口的通風量：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{wi}}{\sum C_{di} A_{wi}} \sum Q_{\text{model}} \quad (4-15)$$

下標*i*代表第*i*個開口，*w*代表迎風面(windward)， C_d 為開口的流量係數。亦即迎風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個迎風面開口；同樣地，背風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個背風面開口：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{Li}}{\sum C_{di} A_{Li}} \sum Q_{\text{model}} \quad (4-16)$$

下標L代表背風面(Leeward)。因為此案例的迎風面上有三個開口，背風面上有兩個開口，表4-10比較各個開口的通風量，皆十分接近用RNG k-epsilon數值模式計算得之通風量 Q ，證明可以用面積比例法計算各個開口的通風量。

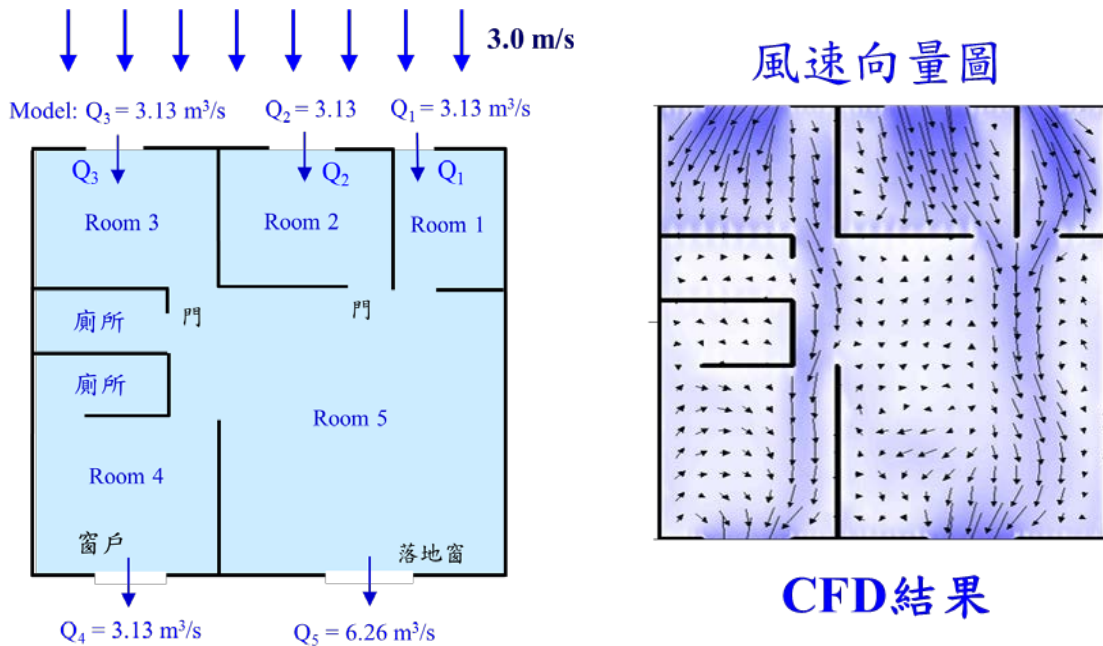


圖 4-13 住宅案例 9-1 之風壓通風量和風速向量圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

(2) **案例9-2**：此例為風向由西往東吹，風向平行於建築物開口，當室內門皆敞開，屬於雙側雙開口的風切通風。計算各個開口處的通風量，譬如廚房到陽台之門的通風量：

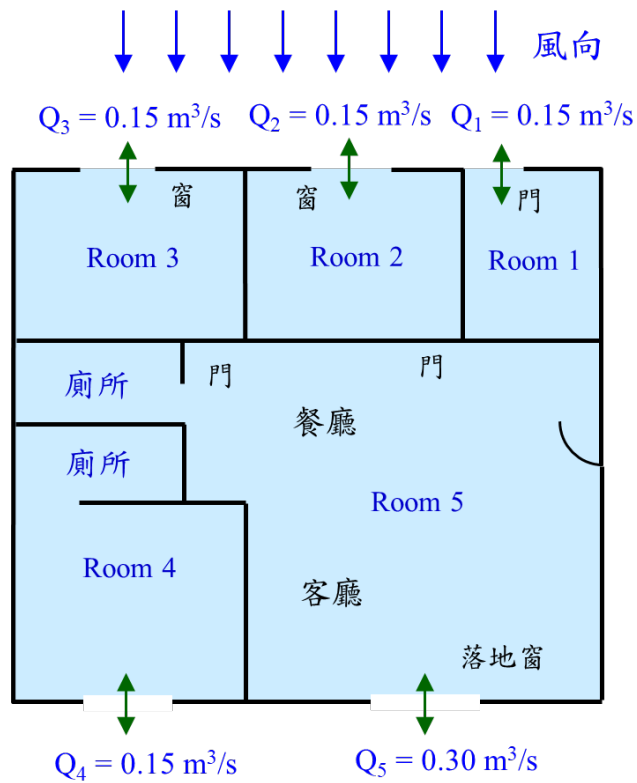
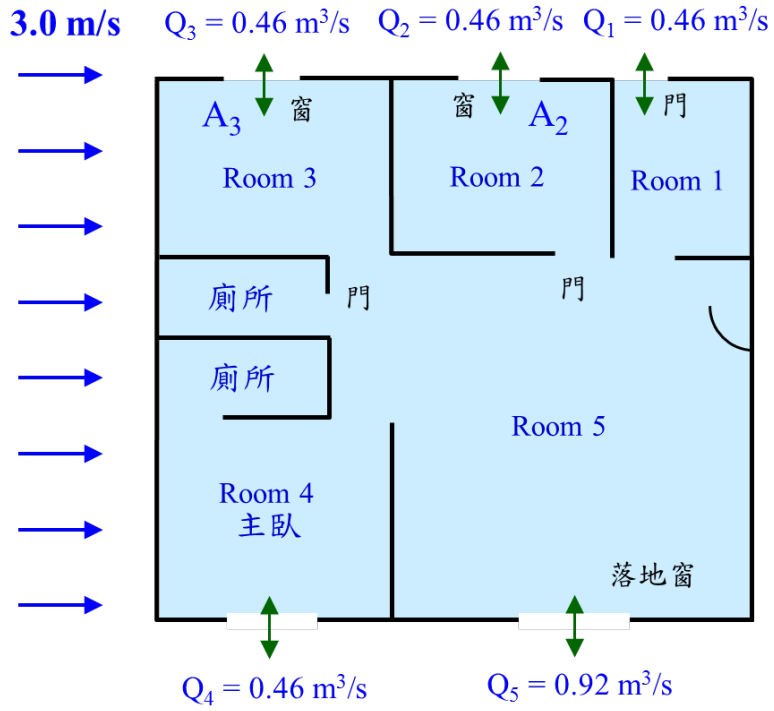
$$Q = 0.077U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 2 = 0.46 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-17)$$

譬如客廳到陽台之間落地窗的通風量：

$$Q = 0.077U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 4 = 0.92 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-18)$$

(3) **案例 9-3**：風向由北往南吹，風向垂直於建築物開口，但室內門皆關閉，屬於單側單開口的風壓通風。譬如廚房到陽台之間的通風量：

$$Q = 0.025U \cdot A = 0.025 \cdot 3 \cdot 2 = 0.15 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-19)$$



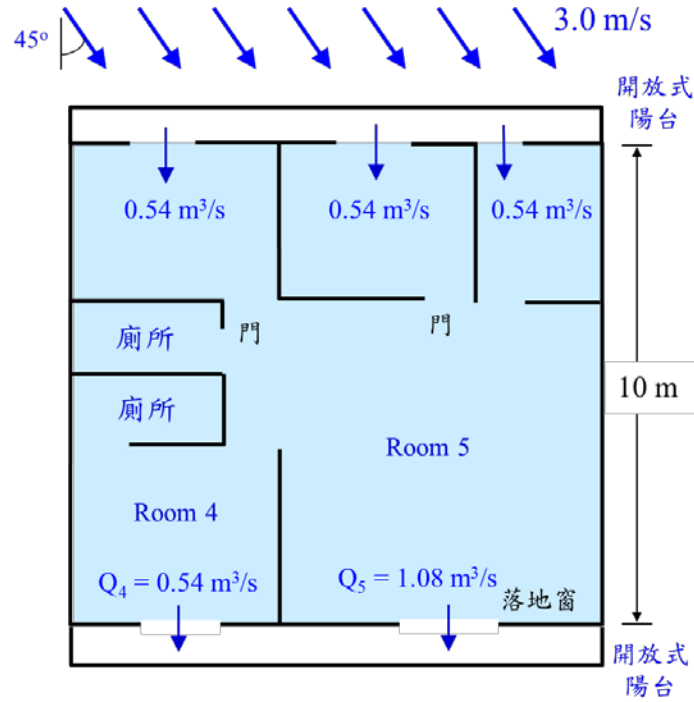


圖 4-14 住宅之風壓通風(a)案例 9-1; (b)案例 9-2; (c)案例 9-3; (d)案例 9-4

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-10 案例 9-1 各房間的通風量(貫流通風)

房間	$Q_{\text{model}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	$Q_{\text{CFD}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	誤差
迎風面 Room 1	3.13	3.48	11.2%
迎風面 Room 2	3.13	2.88	8.0%
迎風面 Room 3	3.13	2.72	13.1%
背風面 Room 4	3.13	2.79	10.9%
背風面 Room 5	6.26	6.30	0.6%
總通風量	9.40	9.09	3.3%

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-11 案例 9-2 各房間的通風量(風切通風)

房間	室內體積 V (m ³)	Q (m ³ /s)	ACH (hr ⁻¹)
迎風面 Room 1	24	0.46	69.3
迎風面 Room 2	48	0.46	24.8
迎風面 Room 3	48	0.46	24.8
背風面 Room 4	82	0.46	20.2
背風面 Room 5	180	0.92	18.4
總通風量	400	-	31.5

表 4-12 案例 9-3 各房間的通風量(單側通風)

房間	室內體積 V (m ³)	Q (m ³ /s)	ACH (hr ⁻¹)
迎風面 Room 1	24	0.15	22.5
迎風面 Room 2	48	0.15	11.3
迎風面 Room 3	48	0.15	11.3
背風面 Room 4	82	0.15	6.6
背風面 Room 5	180	0.30	6.0
總通風量	400	-	11.5

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表 4-13 案例 9-4 各房間的通風量(折減效應)

房間	室內體積 V (m^3)	Q_{model} (m^3/s)	ACH (hr^{-1})
迎風面 Room 1	24	0.54	81.1
迎風面 Room 2	48	0.54	40.6
迎風面 Room 3	48	0.54	40.6
背風面 Room 4	82	0.54	23.7
背風面 Room 5	180	1.08	21.6
總通風量	400	1.62	41.5

資料來源：本研究團隊整理與繪製

譬如客廳落地窗的單側通風量：

$$Q = 0.025U \cdot A = 0.025 \cdot 3 \cdot 4 = 0.30 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-20)$$

由表4-12的結果可看出各房間的單側通風量約為案例9-1貫流通風量的5%，亦即對流窗的通風效果是單側窗的20倍。評估建築自然通風時，可採用較大的通風量(將室內各房間之門視為常開門)來評估自然通風最佳的節能效果。

(4) 案例9-4：風向角 $\theta = 45^\circ$ ，室內外門窗皆開啟，皆裝有紗窗，前後開放式陽台皆有不透風圍牆，圍牆高度1.0 m，上風處有另一棟相同建築物，兩棟建築物之間距離 $S = H = 20 \text{ m}$ 。利用風壓通風模式計算整戶的總通風量 $Q = 9.40 \text{ m}^3/\text{s}$ 。風向角 $\theta = 45^\circ$ ，可得風向折減係數 $K_d = 0.71$ ；陽台圍牆的折減係數 $K_b = 0.67$ ；紗窗的折減係數 $K_o = 0.77$ ；建築物的長度等於10 m，縱深折減係數 $K_L = 1.0$ ；當開口高度在 $z = 18 \text{ m}$ ， $z/H = 0.90 > 0.75$ ，係數 $A = 1.0$ ，故遮蔽效應的折減係數 K_s ：

$$K_s = A - \exp\left(-0.64 \frac{S}{H}\right) = 1 - \exp(-0.64) = 0.47 \quad (4-21)$$

故貫流通風量計算如下：

$$Q = K_d K_o K_b K_s Q_0 = 0.71 \times 0.77 \times 0.67 \times 0.47 \times 9.40 = 1.62 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-22)$$

再用面積比例法計算各個對外開口的通風量，計算結果例於表4-13，可以看出各個開口的通風量 Q 皆小於案例9-1的貫流通風量，但仍大於案例9-2 (風切通風)與案例9-3 (單側通風)之通風量，亦即建築物開口應盡量面對當地的盛行風向，既使有各種因素的影響，貫流通風可以在幾分鐘內，降低室內氣溫。此外，若使用「綠建築評估手冊-基本型」(2019)計算這四個案例的自然通風潛力 $VP = 0.12$ 皆相同，但通風量 Q 卻有很大差異，顯示自然通風潛力 VP 無法反映建築物真實的自然通風狀況。

第七節 浮力通風示範案例

當一棟建築物內部高處和地面有溫度差異，且在外牆高處和低處皆有開口，則室內的熱空氣會由高處的開口流出，而室外的冷空氣會由低處開口流入補充，利用空氣的熱浮力地將熱空氣排出，並促使室內外的空氣上下對流。本示範例為一棟透天式建築物熱浮力通風，如圖10.1，周遭無其他影響風場之建築物，建築物高度為20 m，寬度和長度皆為10 m，建築物的地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ 。建築物迎風面和屋頂各有一個開口，迎風面開口面積 $A_w = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，屋頂開口面積 $A_L = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，兩個開口的高度差異 $z_2 - z_1 = 18 \text{ m}$ 時。開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (4-23)$$

若室外氣溫 $22^\circ\text{C} = 295^\circ\text{K}$ ，室內氣溫 30°C 。當室外風速 $U = 0$ ，通風由熱浮力所主導，因室內外溫差所造成的通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} \right]^{1/2} = 5.70 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-24)$$

式中 T_e 為室外溫度，單位為絕對溫度 $[\text{K}]$ 。當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，風向角 $\theta = 0^\circ$ ，且低處的開口在迎風面，室內外溫差 $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{pw} = 0.78$ ，背風面的風壓係數 $C_{pr} = -0.40$ 。迎風面開口處的風壓 $P_w = 4.2 \text{ Pa}$ ，屋頂的風壓 $P_r = -2.16 \text{ Pa}$ 。通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} + \frac{2|P_w - P_L|}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$Q = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} + \frac{2(4.2 + 2.16)}{1.20} \right]^{1/2} = 8.25 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-25)$$

當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 的狀況，低處的開口在背風面，開口處的风壓係數 $C_{pL} = -0.47$ ，風壓 $P_L = -2.54 \text{ Pa}$ 。高處開口的風壓係數 $C_{pr} = -0.32$ ，風壓 $P_r = -1.73 \text{ Pa}$ 。通風量：

$$Q = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} - \frac{2|-2.54 + 1.73|}{1.20} \right]^{1/2} = 5.27 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-26)$$

因為迎風面開口位於高處，背風面開口位於低處時，室外風速與流出的熱空氣方向相反，風壓與浮力互相抵銷其通風效果。

表 4-14 案例 10 的重要參數及通風量

案例	案例 10-1	案例 10-2	案例 10-3	案例 10-4
室外風速	0	3.0 m/s	3.0 m/s	3.0 m/s
風向角	-	0	0	180
溫差 ΔT	8 °C	0 °C	8 °C	8 °C
A_w (m ²)	4 m ²	4 m ²	4 m ²	4 m ²
A_L (m ²)	4 m ²	4 m ²	4 m ²	4 m ²
A^* (m ²)	1.84 m ²	1.84 m ²	1.84 m ²	1.84 m ²
室內體積	2000 m ³	2000 m ³	2000 m ³	2000 m ³
Q_{model}	5.7 m ³ /s	6.24 m ³ /s	8.25 m ³ /s	5.27 m ³ /s
ACH	10.3 hr ⁻¹	11.1 hr ⁻¹	14.8 hr ⁻¹	9.5 hr ⁻¹

資料來源：本研究團隊整理與繪製

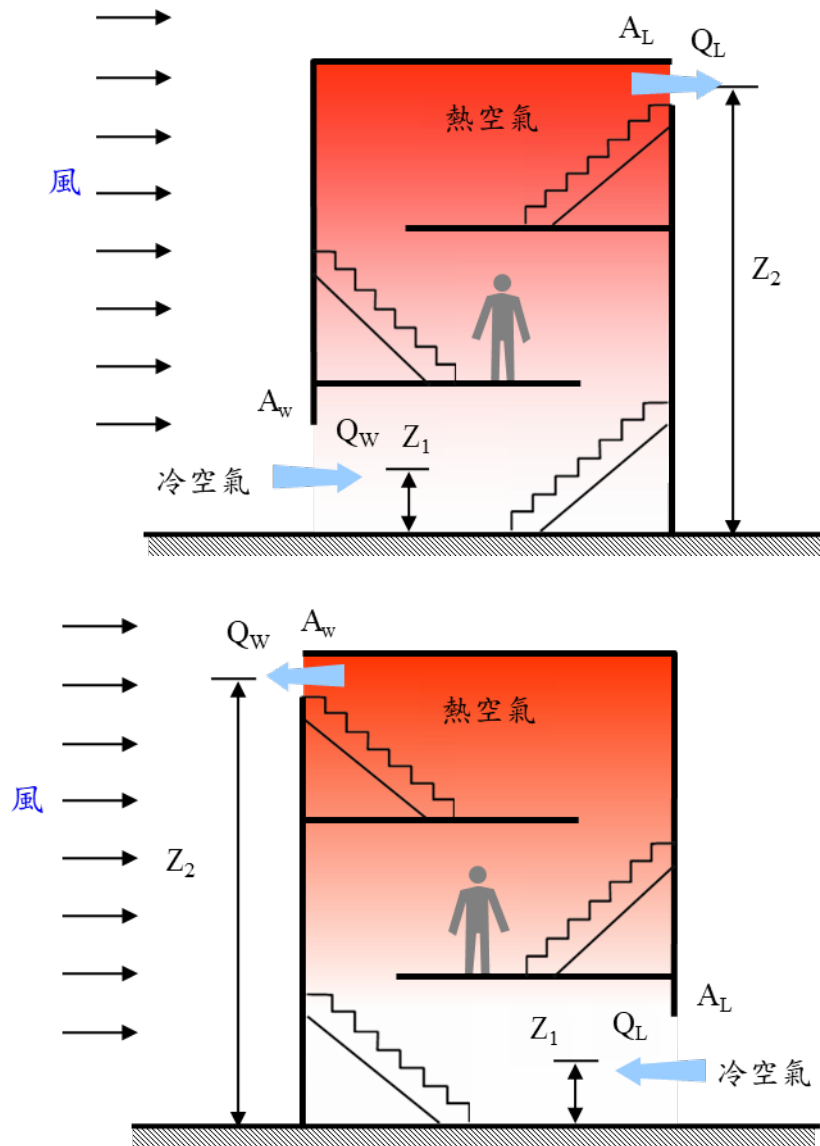


圖 4-15 透天式建築浮力通風之示意圖

資料來源：本研究團隊繪製

熱浮力通風與室內外溫差、建築物內部熱源的強度、位置及室內隔間有密切的關係，以上案例為無室內隔間，只有兩個開口之建築物，真實的建築物設計一定比此示範例更複雜。若想針對一棟特殊的建築物，評估其熱浮力通風量，則需要尋求建築物通風專家或專業機構的諮詢。對於單一樓層的住宅建築物，高低處開口的高度差 $\Delta z < 3\text{ m}$ 時，風壓通風量遠大於熱浮力通風量，浮力通風量可以忽略不計。

第八節 辦公空間之風壓通風示範例

本示範例為一棟室內有隔間辦公空間之風壓通風，建築物總高度 20 m，長度為 16 m，寬度為 20 m，建築物的總地板面積 $A_f = 320 \text{ m}^2$ ，此樓層高度 4.0 m，如圖 4-15。四個角隅與兩側分割成為小型的私人辦公室，中央為開放式辦公空間，建築物迎風面共有六個開口，背風面有四個開口，兩個側面各有三個開口，開口面積皆為 $A = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，開口皆無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數設定為 $C_d = 0.65$ 。中央的辦公區的有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.16 \text{ m}^2 \quad (4-27)$$

在開口高度處的風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。案例 11-1 風向由北向南，迎風面的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ ，皆設定與先前的案例相同。

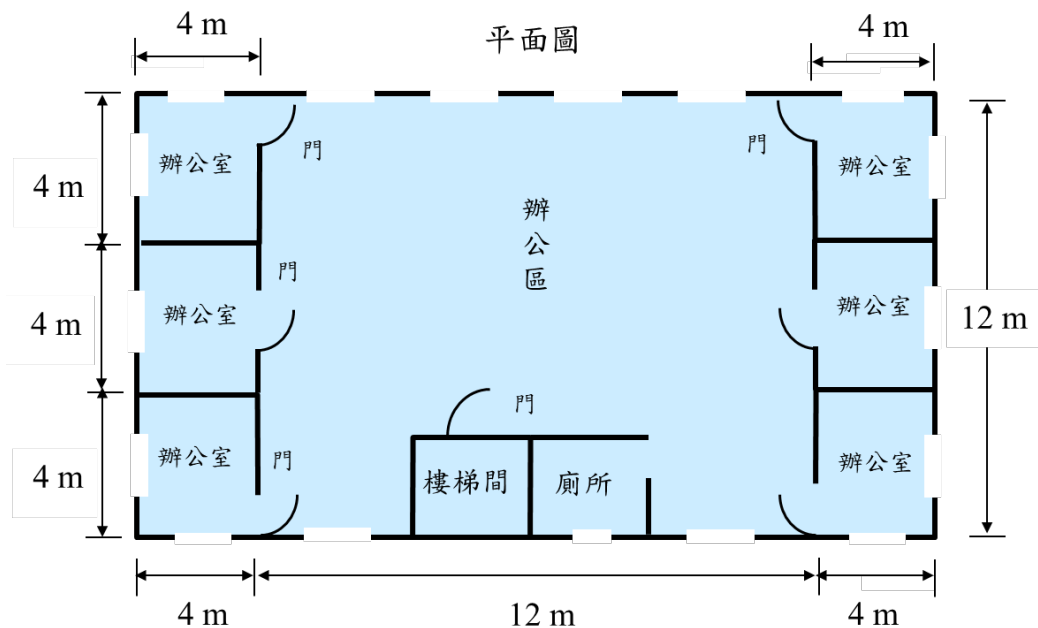


圖 4-16 辦公空間平面圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

帶入風壓通風模式，可得辦公區的總貫流通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.16 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 3.96 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-28)$$

平行於風向的建築物長度 $L = 12 \text{ m} > 10 \text{ m}$ ，縱深折減係數 K_L ：

$$K_L = \left(\frac{12}{10}\right)^{-0.115} = 0.98 \quad (4-29)$$

前方無其他建築物，故遮蔽效應的折減係數 $K_s = 1.0$ ；無陽台圍牆，折減係數 $K_b = 1.0$ 。故流入辦公區的總通風量為：

$$Q = K_d K_o K_b K_L K_s Q_o = 0.98 \cdot 3.96 = 3.88 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-30)$$

將總通風量平均分給迎風面的四個窗戶，每個窗戶處的平均風速為 0.97 m/s，室內的風速又會低於窗戶的風速。迎風面左右兩側的小辦公室，由迎風面吹入的通風量：

$$Q_1 = A^*U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.16 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.50]^{1/2} = 1.57 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-31)$$

「綠建築評估手冊-基本型」(2019) 僅認可三條最短對流路徑，這個案例的辦公區迎風面有四個窗戶，在背風面有兩個窗戶，那一個窗戶是對流窗或是單側窗，計算得之自然通風潛力 VP 可能會有所不同，易生爭議。且流入辦公區的空氣會混合在一起，不易區分其通風路徑，故建議不要以通風路徑來區分對流窗或單側窗。

表 4-15 辦公室案例各區間的通風量

房間	室內體積 V (m ³)	案例 11-1 風向由北向南		案例 11-2 風向由西向東	
		通風量 Q (m ³ /s)	換氣率 ACH (hr ⁻¹)	通風量 Q (m ³ /s)	換氣率 ACH (hr ⁻¹)
辦公室 1	64	1.57	88.3	0.23	12.9
辦公室 2	64	0.23	12.9	0.94	52.9
辦公室 3	64	0.23	12.9	0.23	12.9
辦公區	448	3.88	31.2	1.38	10.8
辦公室 5	64	1.57	88.3	1.57	88.3
辦公室 6	64	0.23	12.9	1.57	88.3
辦公室 7	64	0.23	12.9	1.57	88.3
平均值	-	-	37.1	-	50.6

資料來源：本研究團隊整理與繪製

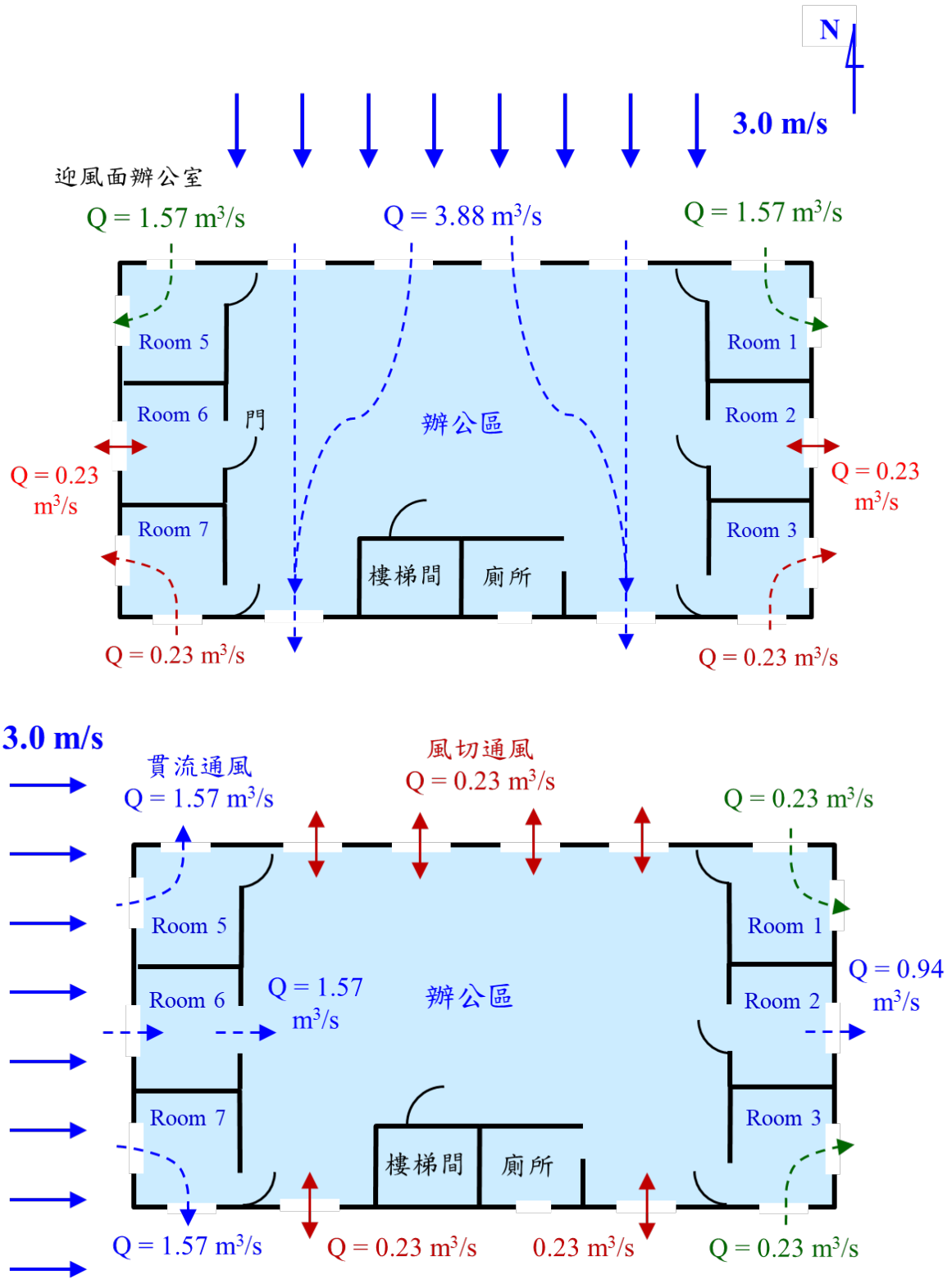


圖 4-17 辦公空間各區的通風量(a)風向由北向南；(b)風向由西向東

資料來源：本研究團隊整理與繪製

兩側中間的小辦公室屬於雙側雙開口風切通風，通風量：

$$Q = 0.077 \cdot U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 1 = 0.23 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-32)$$

由表 4-15 的通風量結果可看出：自然通風與風向有密切關係，評估時需採用當地最大發生機率之風向來計算其最可能之自然通風量。

第九節 中小學教室之風壓通風示範例

此示範案例為中小學教室，在一長排教室中的其中一間教室。教室的長度為 10 m，寬度為 10 m，室內高度 3.5 m，地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ 。教室外有一長條的開放式走廊，走廊上有透風良好之欄杆，維護安全。走廊與教室之間有兩個門，三個窗戶，教室的另一側有四個窗戶，門窗面積皆為 $A = 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，如下圖。開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 4.06 \text{ m}^2 \quad (4-33)$$

當室外風速 $U_H = 3.0 \text{ m/s}$ ，迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.47$ (和前面案例相同)。周遭有其他棟教室，兩棟教室總高度皆為 $H = 20 \text{ m}$ ，之間的距離為 $S = 20 \text{ m}$ ，建築物會互相影響其通風。將風壓係數和有效開口面積帶入風壓通風模式，可得總通風量為：

$$\sum Q = A^* U \left[C_{pw} - C_{pL} \right]^{1/2} = 4.06 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 13.84 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-34)$$

當開口高度在 $z/H = 0.75$ ，係數 $A = 1.0$ ，故遮蔽效應的折減係數 K_s ：

$$K_s = A - \exp\left(-0.64 \frac{S}{H}\right) = 1 - \exp(-0.64) = 0.47 \quad (4-35)$$

故流入教室的總通風量為：

$$Q = K_d K_o K_b K_s Q_0 = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.47 \times 13.84 = 6.50 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-36)$$

教室的換氣率 $ACH = 67$ 。將總通風量平均分給迎風面的四個窗戶，每個窗戶處的平均風速為 0.81 m/s ，教室內的風速會低於窗戶的風速。由此案例看出當教室的門窗正對風向時，有其他建築物的阻礙，貫流通風的效果依然良好。

這個案例迎風面有四個開口，背風面有五個開口，若依照「綠建築評估手冊-基本型」(2019) 僅認可三條最短對流路徑，一樁迎風面窗對三樁背風面窗，可能會造

成計算得之自然通風潛力 VP 有所不同，產生爭議，故建議不要以通風路徑來區分對流窗或單側窗。

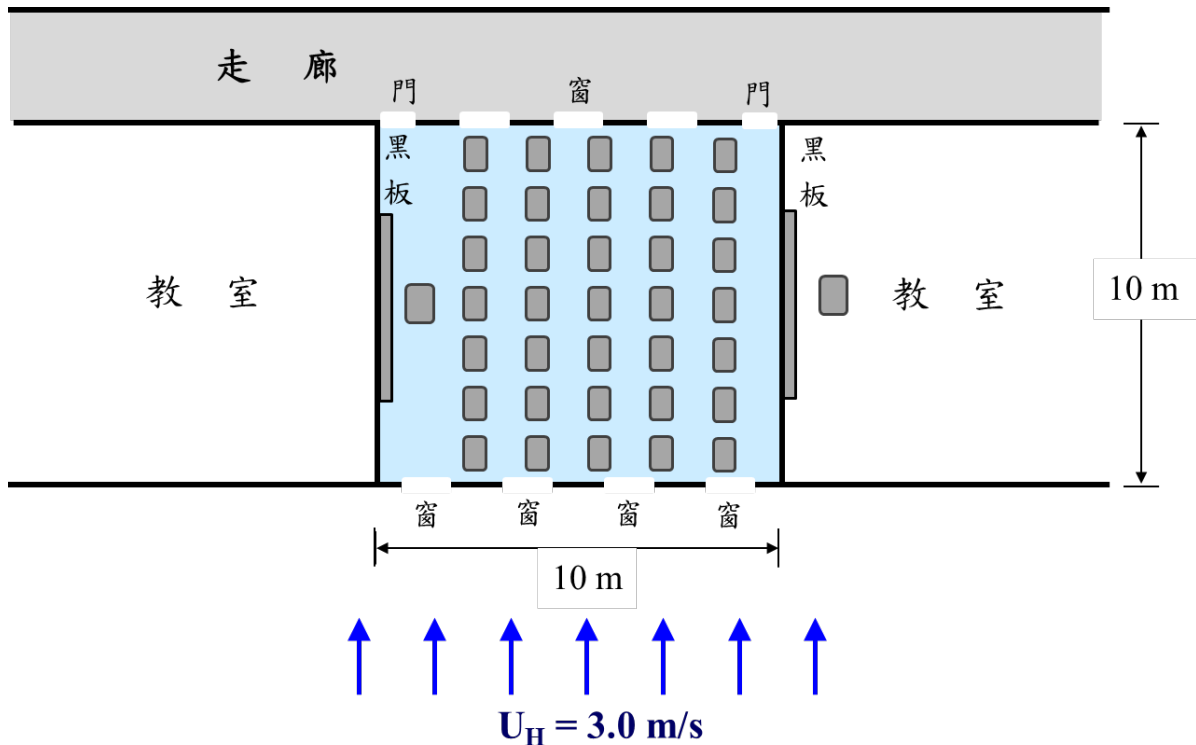


圖 4-18 中小學教室風壓通風之示意圖

資料來源：本研究團隊整理與繪製

第十節 宿舍風壓通風示範例

此案例為一棟宿舍(或旅館)，矩形外型的建築物總寬度為 32 m，長度為 14 m，高度 20 m。每個房間皆是長度為 6 m，寬度為 4 m，室內居室的高度 4.0 m，地板面積 $A_f = 24 \text{ m}^2$ ，只有一個對外開口，開口面積皆相同 $A = 2 \text{ m}^2$ ，如圖 4-19。內部密閉式走廊的寬度 2 m，長度為 32 m，房間至走廊的門屬於不常開之門。對外窗戶無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。周遭無其他影響風場之建築物，在開口高度 $z = 18 \text{ m}$ 處的風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 。當風由此建築物一側吹來，且風向正對窗戶開口時，迎風面和背風面房間開口皆屬於單側通風，各房間的通風量可用單側單開口之公式計算：

$$Q = 0.025 \cdot U \cdot A = 0.025 \cdot 3 \cdot 2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-37)$$

因為每個房間的室內體積皆為 96 m^3 ，各房間的換氣率為 $\text{ACH} = 5.6 \text{ hr}^{-1}$ 。若不計樓梯間和走廊，整棟宿舍換氣率為 $\text{ACH} = 5.6 \text{ hr}^{-1}$ 。

當風向平行於窗戶開口時，各房間的通風屬於單開口風切通風，通風量：

$$Q = 0.018 \cdot U \cdot A = 0.018 \cdot 3 \cdot 2 = 0.11 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-38)$$

每個房間的換氣率為 $\text{ACH} = 4.1 \text{ hr}^{-1}$ 。若不計樓梯間和走廊，整棟宿舍換氣率為 $\text{ACH} = 4.1 \text{ hr}^{-1}$ 。由此案例可看出不論風向，只要室內門關閉，各房間的單側通風效果不佳。

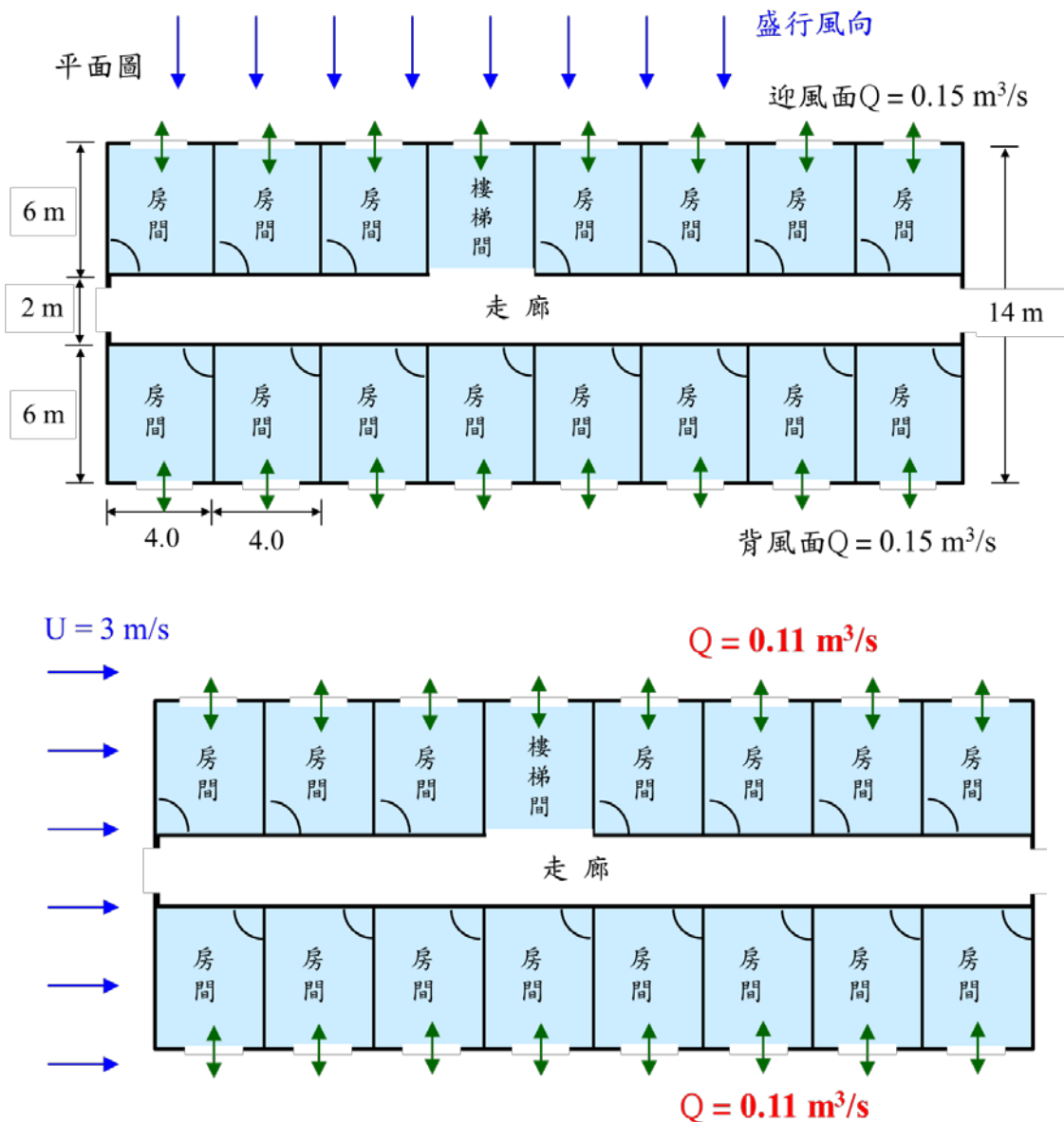


圖 4-19 宿舍風壓通風之示意圖(a)風向正對開口；(b)風向平行於開口

資料來源：本研究團隊整理與繪製

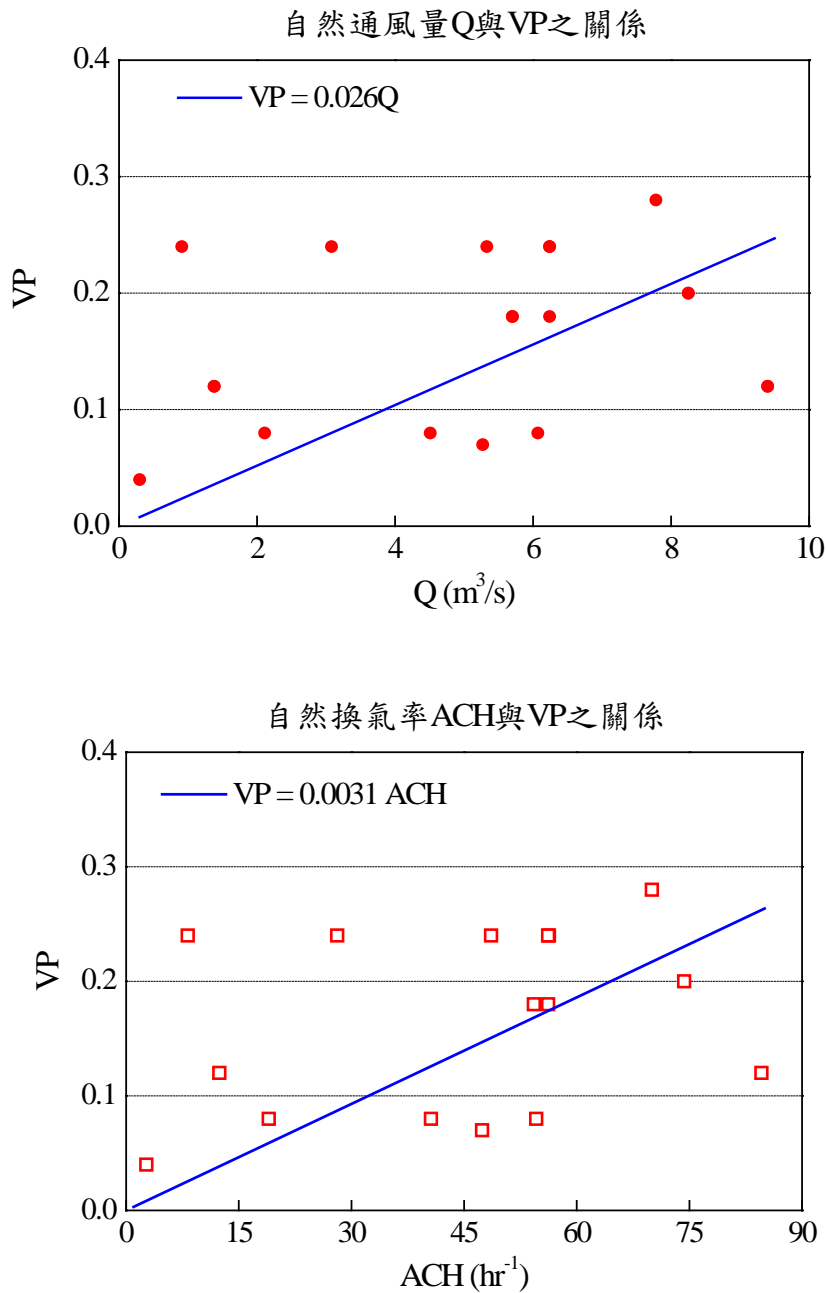


圖 4-20 (a)自然通風量 Q 與 VP 之關係；(b)換氣率 ACH 與 VP 之關係

資料來源：本研究團隊整理與繪製

表4-16整理不同案例的自然通風潛力VP、自然通風量Q和換氣率ACH，並將結果畫在圖4-20。可看出：因為自然通風潛力VP僅考慮對外開口面積 A_v 、 A_c ，不考慮室外風速和風向，故在相同的開口面積下，算出相同之VP值。但有些案例因為開口不在迎風面上，故算出的通風量Q低。換言之，自然通風量Q較能真實地反映不同狀況下的自然通風潛力。

未來修訂「綠建築評估手冊」可先用本研究之模式計算自然通風量 Q 和換氣率 ACH ，再用圖4-20中的迴歸經驗式計算自然通風潛力 VP ，再去評估該建築物採用自然通風時的節能效果。

表 4-16 不同案例之通風量 Q 、自然通風潛力 VP 和換氣率 ACH

Case	風向角	開口	Q (m^3/s)	ACH	VP	V_{ac}
案例 2-1	0°	雙側雙開口	6.24	56.3	0.24	0.80
案例 2-2	30	雙側雙開口	5.33	48.6	0.24	0.80
案例 2-3	60	雙側雙開口	3.08	28.1	0.24	0.80
案例 2-4	90	雙側雙開口	0.91	8.2	0.24	0.80
案例 3-1	0	單側單開口	0.30	2.7	0.04	1.00
案例 4-2	45	單側雙開口	2.11	19.0	0.08	0.96
案例 6-1	0	三側三開口	7.78	70.0	0.28	0.80
案例 6-4	0	雙側雙開口	6.07	54.6	0.08	0.96
案例 7-1	$L = 10\text{ m}$	雙側雙開口	6.24	56.2	0.24	0.80
案例 7-4	$L = 40\text{ m}$	雙側雙開口	4.51	40.6	0.08	0.96
案例 9-1	0°	雙側三開口	9.40	84.6	0.12	0.91
案例 9-2	90°	雙側三開口	1.38	12.42	0.12	0.91
案例 11-1	0°	雙側多開口	5.7	54.3	0.18	0.83
案例 11-2	90°	雙側多開口	6.24	56.2	0.18	0.80
案例 12	0°	雙側多開口	8.25	74.3	0.20	0.80
案例 13	0°	雙側多開口	5.27	47.4	0.07	0.97

第五章 結論與建議

第一節 結論

建築物通風之目的在於提供建築物使用者所需的新鮮空氣、降低室內溫度與污染物濃度，達到舒適的室內環境。台灣夏季濕熱的氣候狀況，使得許多建築物不分日夜地使用冷氣空調來維持建築物室內環境的舒適性，而耗損大量的電力。若能有效地利用自然通風維持室內居住環境，將可達到建築節能之目的。但自然通風受室外風速、風向、室內外溫差及室內隔間等因素的影響，需要考慮的因素較多。台灣的建築物理的相關書籍以及大專院校建築系所在教建築物通風時，大多以定性描述的方式解釋自然通風的重要性，並未說明自然通風量的計算方式。因此，台灣的建築師在設計住宅建築物時，大多不會針對該建築物計算其自然通風量。而大型的公共建築物，建築師大多依賴冷凍空調師計算機械通風量，但採用機械通風往往會過度設計，而耗費大量電力。

建築物自然通風量的計算方式依風向、建築物的形式、開口位置、室內有無隔間而有所不同，不同狀況下建築物的自然通風量有不同的計算方式。本計畫藉由一般常見建築物的案例，說明自然通風量的計算方式，案例包括住宅、辦公大樓、廠房、教室及旅館等各種建築，有系統地說明室外風速、風向、開口面積、位置及阻礙通風之因素對建築物自然通風的影響。希望這本手冊能向國內建築師和一般民眾推廣自然通風的設計概念，讓建築師能設計出適用於台灣建築特性和氣候條件的自然通風建築。並讓建築物使用者瞭解自然通風的原理、操作方式與時機，住戶可依據其需求和室內外的氣候狀況，自行開關建築物的門窗，利用自然通風使得室內環境達到舒適的狀態。

本計畫並將通風模式寫入Excel軟體，建築設計者可以輸入建築物的開口面積及位置、基地的平均風速、盛行風向等氣象資料，便可計算建築物的自然通風量或換氣率。若建築物的自然通風可使得室內環境達到熱舒適的狀況，便不需要使用冷氣空調。本計畫中所舉的建築物案例皆為簡單的矩形外型之建築物，因為矩形外型建築物的外牆風壓有實驗量測值，故計算風壓通風量較容易。雖然其他外型之建築物依然可以使用本計畫中的通風量計算模式，但特殊外型之建築物的外牆風壓不易取得，需要針對該建築物進行風洞實驗或CFD模擬來計算風壓係數。同樣地，當建築物室內隔間

或內部熱源的分佈十分特殊，或複雜地形中的建築物或基地周圍有其他建築物的阻礙，則該建築物的自然通風量的評估需要尋求專家之諮詢。

由本手冊所探討之自然通風案例結果可發現：

1. 自然通風與風速、風向有密切關係，可採用建築基地的年平均風速和盛行風向(最大發生機率之風向)來計算建築物最可能發生之自然通風量。
2. 建築物面對當地盛行風向之外牆宜設置大型開口(面積 1.0 平方公尺以上)，在背風面牆或側牆也有可透風之開口面積開口，形成貫流通風，其自然通風效果最佳。
3. 當建築物外牆上的門窗不是正對當地的盛行風向，可以用餘弦定律來計算風壓通風量。當室外風速大於 1.0 m/s，風向與有開口之外牆的夾角介於 -45° ~ 45° 之間亦有不錯的通風效果。開口平行於風向，通風效果最差。
4. 在相同室外風速、開口面積之下，風向正對雙側開口的貫流通風量大約為單側單開口的通風量的 20~25 倍。
5. 建築物室內無隔間狀況下，雙側雙開口或單側雙開口的通風量皆大於單側單一開口的通風量。當建築物室內有隔間狀況下，自然通風量約為室內無隔間之通風量的 90%~95%。
6. 本研究之通風計算模式使用折減係數量化各種阻礙自然通風的因素，譬如風向、不透風之陽台、建築物縱深、鄰近建築物等，折減係數來自於風洞實驗及CFD模擬結果。
7. 建築物的通風量 Q 愈大，換氣率ACH愈大，建築物的室內氣溫下降的速率愈快。因此建議採用建築物內各區間的平均換氣率ACH來量化建築物自然通風的潛勢。
8. 本手冊所計算的自然通風量皆是理想狀況的預測值，實際建築物會因為室內傢俱、半開之門、窗簾及室外的植栽、周遭的地形等因素，真實的通風量會低於理論預測之通風量。其他會影響自然通風的因素亦可使用折減係數予以量化。
9. 本手冊之通風量模式適用矩形外型之建築物，對於特殊外型、特殊室內隔間、有其他建築物阻礙或複雜地形中的建築物，自然通風量的評估需要尋求專家之諮詢。
10. 「綠建築評估手冊-基本型」(2019)的附錄三「建築物採光通風效益與空調節能率評估原則」和營建署「建築物節約能源設計技術規範」(2019)的附錄三「建築

物自然通風空調節能評估法」，藉由經驗公式計算單側窗和對流窗對自然通風之潛力 VP 的效果，但此經驗式未考慮室外風速、風向、相鄰建築物、各類影響通風因素，無法真實地反映建築物實際的自然通風狀況。且對流窗、單側窗的定義易產生爭議，建議未來修訂新版綠建築評估手冊時可予以修改。

第二節 建議

建議一：

利用公家機關的建築用電資料研究建築物的自然通風潛力及節能效果：立即可行建議

主辦機關：社團法人中華民國風工程學會、內政部建築研究所

協辦機關：交通部中央氣象局、北投公立圖書館

收集新店區內政部建築研究所、北投公立圖書館一整年的建築平面圖、用電量、室內外氣溫、冷氣使用時間及使用自然通風的時段等資料等，利用綠建築評估手冊(2019)所建議之公式計算各棟建築物的自然通風潛力VP與空調節能效果Vac，和實際觀測值比較，以了解VP與Vac值的正確性。再使用建築能源模擬模式EnergyPlus、eQuest等軟體研究採用自然通風的運作模式和節能效果。探討如何落實自然通風於國內的辦公大樓與各級學校，並將其成果提供建築師、冷凍空調技師、政府機關、各級學校、商辦大樓之參考。

建議二：

修訂建築物自然通風潛力之評估方式：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國全國建築師公會、社團法人中華民國風工程學會

內政部建築研所2019年出版的「綠建築評估手冊 基本型」的附錄三「建築物採光通風效益與空調節能率評估原則」與內政部營建署於民國108年12月頒佈之「建築物節約能源設計技術規範」的附錄三「建築物自然通風空調節能評估」有建築物自然通風潛力VP及空調節能效益Vac之計算式，但沒有計算自然通風量之方法。且計算自然通風潛力VP之公式需要單側窗與對流窗之面積，但單側窗與對流窗的定義不夠清楚，易產生爭議。建議未來修訂「綠建築評估手冊」與「建築物節約能源設計技術規範」時，可加上建築物自然通風量之計算方法。

附錄一 期初審查意見表

109.03.10

審查委員意見(依發言順序)	廠商綜合回應
<p>江委員 宇</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 如何去操作多區間通風模式?如何設定多區間通風模式的參數? 2. 目前設計推廣使用 BIM，是否能整合、計算? 3. 目前 PM2.5 嚴重，開窗通風導致於 PM2.5 流入室內，是否能考慮加裝濾網，以及效率? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫所使用的多區間通風模式依據質量守恆去計算通風量，需要輸入的參數包括室外風速、風向，建築物的門窗面積。 2. 通風量與 BIM 之整合並不在本計畫之研究範圍，如未來有其他 BIM 之計畫，可將本計畫所需的建築物門窗由 BIM 輸出。
<p>施委員 建旭</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 曾為建研所發展 TAIVENT 通風模式，用以計算多區間建物通風量，目前使用此模式情形如何?有無蒐集及銷售使用之意見? 2. 評分項目內包含創意及自由回饋及履約期間全職人員薪資等項目，請針對說明。 3. 排定之預定期程，以 10 個月排程，但現已接近 3 月中旬，後續排程應如何調整。另服務項目有定量評估六都建築物使用自然通風之潛勢，請說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 3. PM2.5 濃度視所居住之建築是否鄰近汙染源而定，並非所有地區在所有時間 PM2.5 濃度都很高。建築物不開窗時，室內產生的污染物、病菌、PM2.5 對人體亦有不良影響。門窗上裝設濾網、紗窗可過濾室外大粒徑之懸浮微粒，自然通風量亦會下降，大約會使通風量減少 10~20%。 4. 計畫書中預定期程將依實際情況調整。本計畫預備依據六都的平均氣溫、風速來定量評估六都建築物使用自然通風之潛勢。
<p>崔委員 盛家</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 投標廠商是否有全職員工，P19 林禹安為專任，P22 則為兼任?薪資是否有至少 3 萬元以上?請說明。 	

	<ol style="list-style-type: none"> 2. 服務建議書未提及創意與自由回饋項目，請補充說明。 3. 簡報中採用多區間模式，如何針對東西向日曬與通風模式做對應？台灣特殊颱風對目前研究有多大的影響？簡報中說明都是以獨棟的模式、模擬，實際上台灣大部分是集合式住宅或辦公大樓，用這種模式會遭遇什麼困難？請說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 5. 本計畫助理的最高薪資不得超過 1.5 萬，故改為「兼任」助理，此為本團隊之疏忽，謝謝委員提醒。 6. 自然通風可以用室外的新鮮空氣置換、稀釋室內的病菌、汙染物，降低感染風險。若採用中央空調的機械通風，則有助於病毒在建築物內傳播，則會折減防疫效果。
<p>陳召集人 建忠</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請考量本案與建築應用之接軌，另綠建築標準中亦有通風相關項目，可否統整納入現有計算方法，提升研究成果之效益。 2. 本所環境控制組每年有室內空氣品質及通風各項研究，請整理並截長補短。 3. 自然通風屬於節能上於正面的效益，但防疫面上是否同樣有助益。 4. 室內通風多久需換氣一次，如建議室內二氧化碳濃度為多少時需進行換氣？ 5. 本案如何增加業界使用誘因並降低門檻，加以推廣。 6. 自然通風如何解決 PM2.5 問題。 7. 自然通風量受外界風向風速、建築物座向形狀及室內隔間及空調設備設 	

	<p>置狀況影響，可否於本研究內加以探討？</p> <p>8. CFD 模擬部分請列出要輸入之參數，於研究成果內統整使用方式並將技術供業界及實驗室使用。</p>	
--	--	--

附錄二 第一次專家座談會審查意見表

109.07.01

委員	審查委員意見	委託回應
<p>淡江大學 建築系 王文安教授</p>	<p>1. 肯定自然通風量計算評估手冊，應可輔助綠建築評估更接近實質空間的印證，促進環境改善。</p>	<p>謝謝委員的肯定。</p>
	<p>2. 手冊應強調ACH，通風路徑於節能與室內空氣品質改善的必要性，以確認修正規範的必要性。</p>	<p>本研究之期末報告會討論通風路徑、換氣率ACH是否適宜做為自然通風之量化指標。</p>
	<p>3. 可增加百葉窗與不同密度格柵的實驗印證，以輔助折減係數的計算。</p>	<p>不同密度之格柵、百葉窗對建築物通風影響之實驗研究不在本計畫之範疇，可建議未來建研所以專案計畫加以研究。</p>
	<p>4. 可考量多區間模式的圖說證明方式的要求的圖說內容。</p>	<p>本研究之期末報告將會有多區間建築物自然通風的計算案例。</p>
	<p>5. 可考量選擇專業軟體認證，輔助性能規範之執行可行性。</p>	<p>本研究採用風洞實驗及有經過驗證之CFD數值模式計算建築物之通風量，提升研究成果的可信度。</p>
<p>台灣建築科技中心 黎益肇教授</p>	<p>1. 本研究成果十分豐碩，應用層面可讓設計者找出最佳的設計原則，值得肯定。</p>	<p>謝謝委員的肯定。</p>
	<p>2. 整合常季風風向與建築座向，結合機率分布，計算更可靠的通風折減。</p>	<p>本研究之期末報告將會有台北、台中、高雄三都的風花圖(風向機率分布圖)</p>
	<p>3. 整合「綠建築評估手冊」結果，做進一步整合建議。</p>	<p>本研究之成果可供未來「綠建築評估手冊」修訂之參考。</p>

祺昌工程科技 有限公司 傅仲麟總經理	1. 本研究除了考量建築開口面積外，並考量當地氣象資料，將常年風向納入考量，是相當重要的。	本計畫之研究成果顯示：評估建築物的自然通風必須考慮建築物當地的長年風向或風向的機率分布。
	2. 在實際情形除考量常年風向外亦須考量周邊地形或建築，是否影響該處實際風向，方能有效發揮其作用。	建築物周邊地形及建物會影響建築物的自然通風，但其效應不在本計畫之範疇，可建議未來建研所可以專案計畫加以研究。
	3. 台灣廠房及偏鄉教室，實務上難以安裝冷氣，在計算案例，可以增加類似建築，評估在該類別建築，設計有相當的幫助。	本研究之期末報告將會加入廠房及教室案例，計算其自然通風量。
臺灣海洋大學 河海工程系 蕭葆義教授	1. 資料文獻蒐集完整，並藉由數值模式及風洞實驗分析，提出計算風量公式，且構建簡易型通風量表，方便設計者使用。值得肯定，並已達成計畫預期結果。	謝謝委員的肯定。
	2. 建議未來可增列台灣之建築設計常見隔間開窗形式，納入計算表格。	期末報告會增列台灣之常見建築物隔間形式，納入計算案例。
台北科技大學 建築系 邵文政教授	1. 可考量高樓層與低樓層之差異性，因低層非盛行風向，多為平行開口之巷道風。	對獨棟建築物而言，不同樓層的自然通風之差別在於不同的室外風速。委員所提之巷道風屬於街谷風場問題，不在本計畫之研究範疇，未來建研所可以專案計畫加以研究。
	2. 外推窗有可導風或擋風結果，應詳加研究論述其適用時機。	外推窗在何種風向之下有導風效果不在本計畫研究範疇之內，未來建研所可以專案計畫加以研究。

	3. 對房內門之考量設定開或關，會影響計算或模擬結果。	對房內門之考量設定開或關，會影響計算或模擬結果。
	4. 使用自然通風，應可考量自然外氣條件，包含溫差、濕度、颱風、PM2.5條件之綜合效益，加以因地制宜的評估。	建築物不會在颱風期間採用自然通風，外氣之濕度、PM2.5對建築物的自然通風之使用效益不在本計畫之研究範疇，未來建研所可以專案計畫加以研究。
建國科技大學 設計系 陳若華教授	1. 本研究利用詳細的量化分析探討自然通風效益，對於自然通風利用的設計有實質助益。	謝謝委員的肯定。
	2. 本計畫可建立詳細自然通風計算流程，非常有價值。	謝謝委員的肯定。
	3. 對不同房型的自然通風評估是否可作模式的修正。	本計畫僅研究矩形建築物的自然通風，其他外型之建築物需專案研究，不在本計畫之研究範疇。
	4. 實務上 T_{NV} 如何規劃或取得？可有建議方式？	在自然通風下的室內氣溫 T_{NV} 如不僅與通風量有關，也和建築物所受到的太陽輻射、室內熱源有關。本研究建議採用換氣率ACH來量化降溫速率。
臺灣海洋大學 河海工程系 張景鐘教授	1. 現行規範自然通風潛力VP之計算，單純且固定，(開窗面積，尺寸)。	現行綠建築評估方式需要用到通風路徑計算自然通風潛力VP，但通風路徑之認定與計算十分繁複。
	2. 本研究建議修改VP，考慮當地風速、風向，這些變數如何選取、決定，建議提供範例說明。	本研究之期末報告將會有台北、台中、高雄三都的風速、風向發生機率分布，便可計算自然通風量之機率分佈，但通風潛力VP則無需考慮風速、風向。
	3. 案例平面佈置，開窗位置、大小、尺寸，建議採現行主流建築之資料。	本研究所使用之建築案例、開窗位置、面積接近真實建築物之資料，未來使用Excel可自行修改參數，重新計算。

成功大學 土木工程系 賴啟銘教授	1. 所擬計量法則是可行，可補強VP評估法技術認證之不足，並補充既有規範中未說明2則技術層面： (1) 順應室內通風 main stream，隔間模式並不會嚴重影響通風性能。(2) 好通風路徑要加上足夠壓差 ΔP 及風向才能有通風效果。	謝謝委員的肯定。
	2. 建議(1)Vac在定量上有所難度，確定可利用所擬 CDH_{NV} 、 E_{ac} 來驗證。亦可考量2者所導致 CDH_{NV} 減量以及結構物所導致 CDH_{NV} 減量。(2)通風量可與風速機率分佈結合。(3) 本研究所可結合組高樓影響周邊之衝擊分析。	(1)如何簡化節能效率Vac之計算，確實有其困難度。本研究所建議之冷房度時 CDH_{NV} 、節能效率 E_{ac} 的適用性仍須真實建築物用電數據之驗證，可請建研所未來計畫家以研究之。(2)建築物通風量之計算可結合當地風速、風向機率之分佈。(3)本研究所探討之通風量會受到周邊高樓之影響，但其效應需要更深入之研究分析。
陳建忠組長	1. 請先找幾個建築師或其事務所同仁試要先行測試？加以調和。	本計畫發展之自然通風量Excel試算表已寄給工程組郭建源 研究員測試使用。
	2. 可協調建築科系學生試算，以增加可用性。	本計畫發展之自然通風量Excel試算表可提供給建築系學生測試使用。
建研所環控組 王家瑩 博士	1. 通風面積計算與簡化過程，建議可邀請綠建築評估手冊編撰團隊參與討論，可更了解通風條件的環境背景與設定。	本計畫所整理之通風量計算模式會與綠建築評估手冊編撰團隊的林子平教授討論。
	2. 建議將計算方式提供使用者(建築師、業師界公會)參考，並邀請相關公會與會共同提供建議。	本計畫發展之自然通風量Excel試算表會提供給建築師使用，並在研習會中聽取建築業者之意見。

	<p>3. 仍須考量使用計算上的 便利性、簡易性，讓使用 者更好了解、更容易操 作。</p>	<p>本計畫發展之自然通風量Excel試算表 具有簡易性、便利性等特性。</p>
--	--	--

附錄三 期中審查意見表

109.07.13

委員	審查委員意見	委託回應
陳郁潔 總經理	6. 實務上辦公及商業區難以推行通風設計或獎勵，因為氣密等同於隔音，如果建築物有通風開口，鬧區噪音將無法阻絕。歐洲常見的雙層帷幕系統，也就是外層牆自然排風設計，內層牆為傳統帷幕，可以最為本報告補強論述的方向。	感謝委員的提醒，但台灣僅少數建築物會採用雙層帷幕系統，其隔音與排風效果為十分特殊之問題，並不在本計畫研究範疇之內，建議未來內政部建築研究所可以專案計畫加以研究之。
	7. 建議可補強郊區常見學校或住家或公部門建築開口設計實際案例，並可提供改善前後之VP及Vac。	本研究計畫會以台灣常見住宅及學校教室計算其自然通風量及綠建築評估手冊之VP及Vac值。
	8. 建議報告補充不同狀況模擬之比較線圖。	期末報告會補充不同狀況模擬之流速向量。
	9. 目前期中報告結論趨近一般設計人員共識，但報告應有更進一步論述及更多量化結論。	期末報告會有更進一步論述及量化之結論。
紀委員志旻	2. P.9之研究方法，建議從簡報說明在補充。	謝謝委員的提醒，期末報告會加上研究方法之說明。
	3. P.19 流量係數定義是否能再詳細說明：百葉窗、紗窗、外推窗(推開窗)的定義。EX：有效開口率	本研究有定義“有效開口面積”及百葉窗、紗窗、外推窗的“流量係數”，並未提到“有效開口率”，請委員提供此名詞的定義。

	<p>4. P.64 大型開口定義1 m²以上?落地窗?落地門?推開窗?橫拉窗?</p>	<p>建築物外牆上的落地窗、落地門、橫拉窗、皆為可通風開口。大型開口面積1 m²以上為綠建築評估手冊(2019)中的所定義。</p>
	<p>5. 通風量&換氣率是否愈大愈好?還是會有一定限制?</p>	<p>建築師在設計建築物自然通風量與換氣率應該是愈大愈好。建築物興建之後,若住戶不喜歡過大的自然通風,住戶可以自行關閉門窗,降低通風量。若建築師的設計不佳,限制了建築物的自然通風量與,未來的住戶只能採用冷氣讓室內達到舒適的環境,將會增加建築物所耗費的電力。</p>
	<p>6. 後續研究建議:鄰房&基地建物之關係→盛行風的改變→多開窗(開多少?)→如何因應調整開關</p>	<p>謝謝委員的提醒,鄰房對基地的風速、風向之影響可作為後續研究。建築物興建之後,住戶可依其需求調整開窗面積的大小。</p>
<p>劉玉雯教授</p>	<p>4. 建築物自然通風“設計手冊”之內容章節,如何規劃?</p>	<p>“建築物自然通風設計手冊”正在撰寫中,其章節與內容無法在此一一詳述,請參閱“建築物自然通風設計手冊”之初稿。</p>
	<p>5. 工作研習會之內容,參加對象、人數請說明。</p>	<p>研習會內容是讓業界的建築師了解自然通風量的計算方式,目標是邀請50位建築師、土木技師相關人士來參加。</p>
	<p>6. P.10第3-7行文字說明與目錄不符,請修正。</p>	<p>謝謝委員的提醒,期末報告會修改目錄與文字不符之處。</p>
<p>賴映宇技師</p>	<p>建議後續可研擬廠房結構物的通風檢討,並考慮推射窗、天窗及天井的通風效應。</p>	<p>案例8為廠房建築的自然通風量計算方法、案例10為挑高中庭(有天窗之天井)建築物熱浮力通風之案例。</p>

<p>蔡明修教授</p>	<p>5. 第二章通風模式考量從簡到繁，依「單區間」、「不同風向貫流」、「多區塊貫流」及「多區塊多開口」四種模式依序建立各個對應之通風量評估公式及方法，理論架構與計算邏輯清楚。然本案目的為手冊之編撰，故建議應提供通風量計算之標準應用整體流程，讓設計者能根據流程中的步驟依其設計方案進行通風量之計算。</p>	<p>感謝委員的肯定及提供之寶貴建議，報告書的第二章介紹各類建築物自然通風之計算步驟與方法。</p>
	<p>6. 第三章自然通風潛勢之內容仍屬於初步文獻與方法之探討，且發現不同方法之理論、適用時機及所需參數多有不同，對後續研究有關鍵幫助。建議後階段研究之潛勢分析方法應考量室外風場、室內環境（發熱源、氣溫、相對濕度）及等完整物理參數，建立一個能與此研究所建立之自然通風評估方法相互搭配而進行最佳化之自然通風潛勢演算法(虛擬碼, pseudocode)，甚至分析程式。以供後續不同應用之用。</p>	<p>謝謝委員的肯定及提供寶貴之建議，但自然通風潛勢之演算法(虛擬碼)及最佳化分析程式不在本計畫範圍內，未來可建議內政部建築研究所以專案計畫深入研究之。</p>
	<p>7. 建議提供一個以建築物BIM模型進行計算之案例，以大幅提升本研究在未來與BIM整合之可行性。</p>	<p>謝謝委員提供寶貴之建議，但如何結合建築物BIM模型與自然通風不在本計畫範疇之內，可建議建築研究所未來以專案計畫研究。</p>

<p>王宇睿 總經理</p>	<p>本研究針對各類型式之開口，進行通風量計算，有關雙側雙開口之案例2-1至案例2-4，並無包括相鄰2面牆開口之形式。</p>	<p>案例6有相鄰兩面牆各有一個開口之通風量計算結果。</p>
<p>王副所長 安強</p>	<p>4. 建議期中報告P.65建議二暫且保留，還需要時間溝通，不要急著表達於報告中。</p>	<p>感謝委員的提醒，本研究團隊會再與環控組討論，期末報告會修改建議二。</p>
<p>王副所長 安強</p>	<p>5. 預期成果三定量評估台灣六都建築物使用自然通風的潛勢，報告中並無看到此項，是下半段要進行還是這段不要了?請說明。</p>	<p>期末報告會補充同一棟建築物在六都不同的平均風速、盛行風向下模擬得之自然通風量和換氣率。</p>
<p>陳建忠組長</p>	<p>3. 請將計算程式改成網頁雲端，在後端手續協助運算，以使用端只要列印輸入及成果資料即可。</p>	<p>計算自然通風量之公式都寫在第二章，用手持之電子計算機便可計算，無需用網頁或雲端程式。</p>
<p>陳建忠組長</p>	<p>4. 安修像建築，請先洽本所環控組同意之版本。</p>	<p>感謝委員的提醒，本研究團隊會再與環控組討論。</p>
<p>陳建忠組長</p>	<p>5. 說明會以計算案例，增加交流意見，是否單純以案例來準備可能之例。</p>	<p>通風研習會中會以案例介紹計算自然通風量之方法。</p>
<p>陳建忠組長</p>	<p>6. 本主題和本所其他類似研究，加強深度，才能面對問題，標題多了計算兩字，但仍有實的疑問。</p>	<p>本研究所提出之自然通風計算模式皆有經過風洞實驗及CFD數值模式之驗證，且與國外通風研究之成果比對，模式的正確性無庸置疑。</p>
<p>郭副研究員 建源</p>	<p>1. 此案計算過程以Excel進行計算，入流的C_p值還是要經過風洞試驗，有無簡易方法進行計算?</p>	<p>若沒有建築物外牆的風壓係數C_p值，可以迎背風面風壓係數差值$\Delta C_p = 1.0$，來計算建築物的自然通風量。</p>

	<p>2. 一般通風以平均風壓係數去做入流條件，因風壓係數數值會正負脈動顯示，平均值會變小，實際上如有特別狀況，是否能反映出現實狀態？</p>	<p>真實狀態下，風壓會隨風速不穩定地變化，但其正負脈動對建築物通風的影響很小。故一般建築物皆以風速、風壓的時間平均值來計算自然通風量。</p>
	<p>3. 研究以多區間模式流入等於流出進行迭代，迭代過程中C_p值太小或是兩邊通風都是負風壓時在計算上會不會無法收斂？會不會因誤差導致通風在計算時受影響？</p>	<p>多區間模式迭代過程中，當壓差ΔC_p值太小時，通風量亦小，故計算上不易收斂。而本研究之模式採用經驗式計算單開口或外牆風壓差ΔC_p很小之通風量，故可避免計算模式不易收斂之問題。</p>
<p>林研發替代 役元智</p>	<p>1. 關於計畫中使用許多之案例，使用此案例大部分屬於哪些人或族群？</p>	<p>建築業界在評估建築物自然通風時，有些建築物師會畫通風路徑來定性說明自然通風之概況，在申請綠建築標章時，有些建築師會付費請綠建築評估公司計算自然通風潛力VP值。未來建築師、綠建築評估公司人員可採用本模式計算。</p>
	<p>2. 文中所提到不同地區有不同的盛行風方向，因市區內建築物較密集，盛行風方向如何判別？</p>	<p>若想深入瞭解市區某一特定棟建築物周圍風速、風向，可針對該棟建築物及相鄰建築物以CFD或風洞實驗來研究，及其自然通風量。一般性建築物則可採用該地區的盛行風向。</p>

附錄四 第二次專家座談會審查意見表

109.09.25

委員	審查委員意見	回應
張矩墉建築師	10. 建築師設計時很難先由通風採光的優劣切入，很多都是由法令的限制決定。	若建築物的開口無法正對當地之盛行風向，依然可用本研究之模式計算其自然通風量。
	11. 建築師計算時希望能夠較為簡易，而不是透過複雜的計算才能得到結果。	使用本研究所發展之Excel檔，可以很容易地計算出建築物之自然通風量。
	12. 風花圖如果只是取同一縣市資料的方式可能過於粗略，如同樣是高雄市、前鎮、小港與桃源六龜的山地區可能差距會很大。	中央氣象局在台灣各地共有四百多個無人氣象測站，建築師可蒐集最靠近建築基地之氣象站資料，去計算該地區最可能發生之風速與風向。
	13. 通風模式的修正K有不同項目的折減，各折減是否有那些是較重要的，而應給較高的權重值。	不同之K值是反映不同的阻礙通風的因素參數，其權重值隨阻礙效應而有所不同。
	14. 陽台欄杆的形式種類會很複雜，可能要以孔隙率再來修正。	本研究僅探討水泥圍牆對於自然通風之影響，若陽台欄杆為可透風之欄杆，折減係數因其孔隙率而有所不同。
陳俊芳建築師	7. 建議對於通風條件差之住宅單元，能否提補救措施(例簡報p38之案例)	若建築物自然通風之條件不佳，可採用抽風機機械通風或導風設施等補救措施。
	8. 同意既有VP檢討方式與本案研提之換氣率並行(對於以VP檢討不符規定者，可用之)，並建議能以簡單公式檢討，計算時間不宜超過VP檢討時間。	VP值的計算十分簡單，但無法反映建築物真實的自然通風狀況。本研究所提出通風量之計算式，並不會過於複雜。建築業者若想申請綠建築標章，可使用電子計算機或本研究發展之Excel檔，可在一天之內計算出建築物之通風量與換氣率。

	<p>9. 推射窗模擬角度採30度，是否考量可達90度?</p>	<p>自然通風量與推射窗之角度有關，推射窗外推90度，折減係數接近1.0。</p>
	<p>10. 簡報p.50，建築物長度(縱深) 40 m之情況，於通風型建物極少見。</p>	<p>該案例是探討建築物長度(縱深)對通風量之影響，故以不同長度的建築物為例來比較其然通風量。且有一些大型建築，如工廠廠房、室內運動場的長度會超過40 m。</p>
	<p>11. 簡報p.61，案例之溫度設定為8度C，於可通風時段，季節之溫差約為3-5度，何有落差?</p>	<p>簡報p.61示範案例為探討熱浮力通風量，假定室內外溫差為8°C，其他溫度差異亦可使用相同的計算方法計算熱浮力通風量。且台灣夏季中午時段，室外溫度35 °C，室內溫度26 °C，溫差可能會達到7~9 °C。</p>
<p>王文伶經理</p>	<p>3. 目前的計算法是有便利於設計階段對於成果的驗證價值極高。</p>	<p>感謝委員的肯定。</p>
	<p>4. 目前手冊的計算法與實際計算的結果尚未能有一致性，尚有整合之處，目前應可採取併行規劃。</p>	<p>綠建築評估手冊的VP不考慮室外風速、風向，且對流窗的定義不夠清楚，容易產生爭議。未來可修訂綠建築評估手冊中VP的計算方式。</p>
	<p>5. 盛行風的採用與人居使用的行為不同，建議參考風向採可開啟窗的季節為宜。</p>	<p>本計畫的目的在於提出一個計算建築物自然通風量之模式，建築業者若想依照人居使用建築物之行為，分季節、分日夜地分析建築基地的盛行風向與平均風速後，仍可採用本研究之通風模式自行計算建築物之自然通風量。</p>
	<p>6. 綠建築評估手冊之計算認定差異請再修正。</p>	<p>綠建築評估手冊中的單側窗、對流窗定義不夠清楚，容易產生困擾與爭議。本研究對於單側通風、對流通風皆有明確的計算方法。</p>

林憲德教授	8. 研究成果良好。	謝謝委員的肯定。
	9. 本研究以軟體模擬方法建議可與現行VP法並用，但必須等待綠建築手冊與技術規範同步修改，有待日後協調。	現行的VP可與本計畫的通風計算模式所計算得之換氣率ACH並用來評估建築物的自然通風能力。
	10. 綠建築VP法對流窗為單側窗之倍數有待朱教授一同商議調整。	綠建築手冊中對流窗、單側窗之效益倍數可修改、調整。
	11. 風速風向會受都市風道、中庭、鄰房之影響，同時在高溫期多轉為空調，只在春秋季節可能自然通風，本研究採用氣象局盛行風向風速數據值得再檢討。	都會地區，近地表(20公尺以下)之風場會受街道、相鄰建築的影響，但高處(30公尺以上)之風場較不受街道及建築物影響。中央氣象局的風速計皆設置於較高之處，具有一定的可信度，代表該地區最有能發生的風速與風向。建築業者若想分季節來評估建築物的自然通風，仍可使用本研究之通風模式。
陳以侖顧問	初步試用朱老師的Excel試算表後，有下述建議： 1. 鄰棟遮蔽效應的考慮，目前僅有S/H。 (1)是否為鄰棟高度與本棟開口高度差(ΔH)而不是開口高度。(2)平面上常見半遮蔽，上風處二棟，上風建築有角度等較複雜因子，輸入的判斷上仍有困難。	每棟建築物的形狀、高度皆有所不同。在都會地區，前後棟建築物的高度、間距有無數種不同組合之可能性。本計畫計算兩棟相同的建築物，不同開口高度之通風量為範例，但無法一一計算各種不同高度組合、不同遮蔽狀況下的通風量。建築業者若想申請綠建築標章，應請專家使用風洞實驗或CFD模式評估該建築物的自然通風。
	2.風切通風計算時，建築物深度，風切角度是否可納入計算。	目前本模式並不考慮建築物深度對風切通風之影響，不同的建築物縱深、風切角度等細節有待後續之研究。

附錄五 期末審查意見表

109.10.29

委員	審查委員意見	委託回應
郭建築師自強	1. 建議名稱改為評估參考手冊。	本計畫之手冊名稱已於期初建研所會議中確定，無法於期末修改。
	2. 本案建議僅適用於住宅大樓參考用。	本研究之通風模式依據學理，可適用於廠房、辦公室、宿舍、和住宅自然通風量之計算。
	3. 公式簡化，以帶入外牆開口即可計算通風結果。	本研究在考慮模式的正確性下，已採用最簡化的方式來計算自然通風量。
	4. 折減係數種類多， K_d 、 K_o 、 K_b 、 K_s 、 K_c ，則減多次結果為何？可否簡化表格式，制式化。	折減係數在報告中皆有說明，當多重折減之後，則通風量變小。若制式化折減係數，無法反映不同狀況的通風。
	5. 開窗形式多種（推窗、拉窗、排煙窗…），面積如何計算？	窗戶面積為氣流可通過之斷面積。
	6. 室內門多到如此外窗面積小，是否有折減？	本模式只採計建築物外牆之開口面積，室內門只分全關或全開，無須折減。
	7. 室內多隔間，公共走道及開口通風如何納入計算？	本研究發現：室內隔間對自然通風量影響有限，為簡化計算起見，不考慮室內隔間。
	8. 外牆、格柵、遮陽板、擴張網…多種外觀如何計算？	這些特殊設施對自然通風之影響可在未來的計畫來研究。
	9. 廁所之通風納入通風檢討。	一般的廁所對外開口小，多採用機械通風，本研究不計廁所的自然通風量。

	10. 台北市多區，盆地，風速是否有多種情況？	本研究發現：在台北盆地內，不分區域，常年風向多集中東風，平均風速介於2.0 ~ 3.0 m/s。
	11. 對流單一、兩面、三面、四面通風開口是否折減？	當建築物有兩面(含)以上的外牆有對外的通風開口，則屬貫流通風。折減與否取決於室外風向、紗窗、外推窗、陽台等設施。
陳教授若華	3. 研究成果對促進健康、節能、建築設計甚有助益，成果豐碩。	謝謝委員的肯定。
	4. 室內隔間對貫流通風的影響模式，建議補充說明。	本研究發現：室內隔間對貫流通風量影響有限，為簡化計算起見，不考慮室內隔間。
	7. 陽台欄杆如其孔隙率甚高時（如欄杆式），是否可視同無陽台女兒牆評估？	當建築物陽台的欄杆的孔隙率很高時，可視同陽台無遮蔽效應，折減係數 $K = 1.0$ 。
	8. 本研究建議以通風換氣率作為自然通風評估指標，甚有價值，值得推廣。	謝謝委員的肯定。
陳總經理郁潔	1. 帷幕牆系統目前少數設計會放入自然換氣(如下圖)，可為後續研究納入。	國內的帷幕牆系統只會留必要的逃生開口，不會多設開口作為自然通風之用，故採用帷幕牆的建築物耗能皆十分嚴重。
陳建築師啟中	1. 「盛行風向」名詞較少用，建議用「常時風向」。	氣象書籍多用「盛行風向」，本報告會並用「盛行風向」與「常時風向」。
	2. 風花圖以全年為基準，一般台灣夏季需要風，冬季不要，建議採夏季風花圖。	謝謝委員的提醒，會列出台北市各季的風花圖。

	3. 按國內法規，教室採光面積需要為外牆面積的1/5，應足夠自然通風之用。	若建築物採光之窗戶面積為外牆面積的1/5，且窗戶皆可打開，讓氣流流經開口，應足夠自然通風之用。
	4. 節能之比較。	自然通風的節能效果並不在此研究案的範疇，未來可另案研究。
	5. 建議可提供Excel程式。	只要寫信給計劃主持人，皆會免費提供計算自然通風之Excel程式。
蔡教授明修	12. 研究成果十分豐碩，對實務及教育街可能有突破。	謝謝委員的肯定。
	13. 建議建築設計常見之室內隔間類型進行案例計算範例。	本研究發現：室內隔間對貫流通風量影響不大，為簡化計算起見，不考慮室內隔間。
	14. 建議思考範例中是否加入室內隔間設計方案分析問題。	本研究發現：室內隔間對貫流通風量影響有限，為簡化計算起見，不考慮室內隔間。
	15. 此研究的分析方式與綠建築手冊之間可能存在的差異應如何考慮?建議可說明陳述。	期末報告會加上綠建築手冊計算之自然通風潛力VP與本研究案計算之通風量Q之比較表。
王副所長安強	1. 書面報告中缺附錄。	謝謝委員提醒，本研究團隊將在結案報告中補齊。
	2. 本研究成果中有做出與綠建築手冊VP值之差異，是否有可能使用常用建物找出與VP值之差異進行係數分析並進行校正?	期末報告會加上綠建築手冊計算之自然通風潛力VP與本研究案計算之通風量Q之比較表。

陳組長建忠	1. 林憲德老師覺得綠建築手冊可與此研究並行，建議未來並行在描述、策略上可以多考慮。	未來修訂綠建築評估手冊時，可將列一張自然通風潛力VP與本研究案計算之通風量Q之比較表。
	2. 本研究通風量與綠建築手冊VP值做出差異分析，會後可與本所環控組進行調整。	期末報告會加上一張自然通風潛力VP與本研究案計算之通風量Q之比較表，供環控組修訂綠建築評估手冊之用。

附錄六 自然通風量計算評估手冊(初稿)

建築物自然通風量計算評估手冊
(初稿)

目次

目次	122
表次	124
圖次	126
第一章 手冊導覽	129
第一節 編撰目的	129
第二節 適用範圍和方法	136
第三節 基本名詞定義	138
第三章 通風計算模式	147
第一節 單區間通風模式	147
第二節 不同風向之貫流通風	151
第三節 多區塊貫流通風模式	156
第四節 多區塊多開口模式	158
第五節 通風量計算步驟	160
第四章 室內無隔間貫流通風示範例	166
第五章 不同風向之風壓通風示範例	172
第六章 室內有隔間之風切通風示範例	179

第七章 三側三開口之風壓通風示範例	181
第八章 廠房之貫流通風示範例	185
第九章 住宅之風壓通風示範例	188
第十章 浮力通風示範案例	197
第十一章 辦公空間之風壓通風示範例	201
第十二章 中小學教室之風壓通風示範例	204
第十三章 宿舍風壓通風示範例	206
第十四章 自然通風 EXCEL 試算表使用方式	209
參考文獻	216

表次

表 1- 1 各種建築空間單位樓地板面積最小通風量	130
表 2- 1 不同地況的邊界層高度與指數	142
表 2-2 台灣六都的平均風速與盛行風向	143
表 3- 1 建築物外牆百葉窗、紗窗、外推窗(推射窗) 折減係數 K	161
表 4-1 不同樓層之貫流通風量.....	169
表 4-2 不同開口裝置之貫流通風量	169
表 4-3 不同長度建築物的貫流通風量.....	172
表 5-1 不同風向角之風壓通風量.....	174
表 5-2 風向平行於建築物開口之風壓通風量.....	176
表 5-3 不同風向下單側雙開口室內無隔間之風壓通風量....	178
表 6-1 不同風向單側雙開口室內有隔間之風壓通風量.....	179
表 7- 1CFD 模式計算得之案例 6 的風壓通風量.....	183
表 8- 1 廠房之風壓通風量.....	186
表 9-1 案例 9-1 各房間的通風量(貫流通風).....	193
表 9-2 案例 9-2 各房間的通風量(風切通風).....	193
表 9-3 案例 9-3 各房間的通風量(單側通風).....	195
表 9-4. 案例 9-4 各房間的通風量(折減效應).....	195

表 10-1 案例 10 的重要參數及通風量 199

表 11- 1 辦公室案例各區間的通風量..... 203

表 13- 1 不同案例之通風量 Q 、自然通風潛力 VP 和換氣率 ACH
..... 207

圖次

圖 1- 1 自然通風和機械通風之示意圖	132
圖 1-2 建築物自然通風量之應用	136
圖 2-1 不同地況之平均風速剖面.....	140
圖 2-2 台北市全年的風花圖(2000-2008)	143
圖 2-3. 新北市全年的風花圖(2000 - 2008).....	144
圖 2-4 桃園市全年的風花圖(2018)	144
圖 2-5. 台中市全年的風花圖(2000-2008)	145
圖 2-6. 台南市全年的風花圖(2000-2008)	145
圖 2. 7. 高雄市全年的風花圖(2000-2008).....	146
圖 3- 1 紗網窗、百葉窗、外推窗之流量係數	148
圖 3-2 單區間雙開口貫流通風之示意圖	150
圖 3-3 單區間多開口建築物之示意圖	151
圖 3-4 不同風向角之風壓通風量	152
圖 3-5 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖.....	153
圖 3-6 單側單開口及雙側雙開口的風切通風量.....	154
圖 3-7 有室內隔間雙開口建築物通風之示意圖.....	155
圖 3-8 室內隔間對雙開口建築物通風量之影響.....	155
圖 3-9 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖.....	157

圖 3-10 建築物有室內隔間風壓通風之示意圖..... 159

圖 3-11 建築物外推式陽台對落地窗風壓通風影響之示意圖. 162

圖 3-12 相鄰建築物影響下風建築物風壓通風之示意圖..... 163

圖 3-13 建築物自然通風計算之流程圖..... 164

圖 4-1 對側開口貫流通風之示意圖..... 168

圖 4-2 外推窗與牆面夾角之示意圖 170

圖 4.-3 建築物縱深對貫流通風之影響 171

圖 5-1 不同風向下建築物風壓通風之示意圖..... 174

圖 5-2 建築物的開口與風向的夾角之示意圖..... 175

圖 5-3. 風向平行於建築物開口之風壓通風..... 177

圖 6- 1 單側雙開口建築物之風壓通風..... 180

圖 7-1 三側三開口建築物室內隔間及開口位置之示意圖.... 182

圖 7-2 三側三開口建築物之風壓通風量 184

圖 8- 1 單區間多開口廠房風壓通風之示意圖..... 185

圖 9-1 住宅室內隔間之示意圖 188

圖 9-2 住宅案例 9-1 之風壓通風量和風速向量圖..... 190

圖 9-3. 住宅示範例之通風(A)案例 9-1； 192

圖 10-1 透天式建築浮力通風之示意圖 198

圖 11- 1 辦公空間風壓通風(A)示意圖；(B) 202

圖 12- 1 中小學教室風壓通風之示意圖..... 205

圖 13- 1 宿舍風壓通風之示意圖..... 207

圖 13- 2 (A)自然通風量 Q 與 VP 之關係；(B)換氣率 ACH 與 VP
之關係..... 207

第一章 手冊導覽

第一節 編撰目的

建築通風主要的目的是提供建築物使用者所需的新鮮空氣、調節室內氣溫與排除室內空氣中的污染物或濕氣，達到健康和舒適的室內環境。台灣夏季濕熱的氣候狀況，使得許多建築物不分日夜地使用冷氣空調，僅為維持室內氣溫在一個舒適的狀態，但需要耗費大量的電力。台灣的春、秋、冬三季的氣候狀況，則適用自然通風，打開建築物外牆上的門窗，即可達到建築物所需的換氣需求。表 1 為台灣內政部營建署 108 年頒訂之「建築技術規則建築設備編」第二節機械通風系統所訂定之各種用途建築空間設置機械通風設備的最小通風量規定。以一般住宅的起居室、臥室、私人辦公室為例，單位樓地板面積最小通風 $8.0 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，藉由自然界的風力驅動，很容易就達到此通風量。亦即一般住宅的起居室、臥房，除了氣候炎熱需要使用冷氣降溫，平時使用自然通風便有足夠的換氣率，不需要使用機械通風。其他用途之建築空間則視其用途、樓地板面積大小、是否有對外開口、開口面積等因素而定。因為使用的目的不同，有不同的通風需求。因此建築師必須依據建築物的使用特性、當地的氣候、風速、風向條件，來設計建築物的自然通風量和機械通風量，讓住戶依氣候狀況選擇使用。

許多國家皆針對不同的建築物用途訂定通風量的標準，譬如美國環保署(US EPA)室內空氣品質規範(Building Air Quality, 1998)建議若不使用機械通風的狀況下，住宅之最低的小時換氣率(Air change per hour, ACH)須維持在 0.35 ACH。小時換氣率(ACH)的定義為：

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

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 $[\text{L}^3/\text{T}]$ 。換氣率 ACH 的單位為 $[\text{1}/\text{hour}]$ 。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，污染物愈不易在室內蓄積。

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 ACH 須維持在 0.35。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ACH必須維持0.3以上。日本工業標準(JIS, 2003)建議：住宅換氣率ACH必須達到0.5以上，非住宅換氣率ACH必須達到0.3以上。

換氣率的倒數則可視為室內空氣更新所需的時間尺度：

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (1-3)$$

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 τ 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。當一棟建築物的室內氣溫高於室外氣溫時，若換氣的時間尺度 τ 愈大，則室內氣溫被室外冷空氣置換而降溫的速度愈慢。

建築物可採用自然通風(Natural ventilation)與機械通風(Mechanical ventilation)的方式來達到其換氣的需求。自然通風是藉由自然界風力(如圖1所示)或室內外的溫度差異驅使空氣流動，可節約能源，但未必能達到足夠或可降低室內氣溫的通風量。機械通風又稱為強制通風，是利用風扇、抽風機或送風機促使空氣交換和流動，可控制通風量，但耗費能源。台灣的許多建築物在夏季，大多使用冷氣空調來維持室內環境的舒適性，但亦會耗費大量的電力。因此若能有效地利用自然通風，減少冷氣空調的使用，將可達到節能減碳之目的。

表 1-2 各種建築空間單位樓地板面積最小通風量

房間用途	通風量 (m ³ /hr/m ²)
起居室、臥室、私人辦公室	8
大型辦公室、會客室	10
工友室、警衛室、收發室、詢問室	12
會議廳、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	15

塵較少之工作室、印刷工場、打包工場	
吸煙室、學校	20
營業用餐廳、咖啡廳、酒吧	25
戲院、電影院、演藝場、集會堂之觀眾席	75
營業用廚房	60
非營業用廚房	35
衣帽間、更衣室、盥洗室、樓地板面積大於15 m ² 發電或配電室	10
茶水間	15
住宅內的浴室、廁所	20
公共浴室、廁所及可能散發有害氣體之工廠	30
汽車庫	25

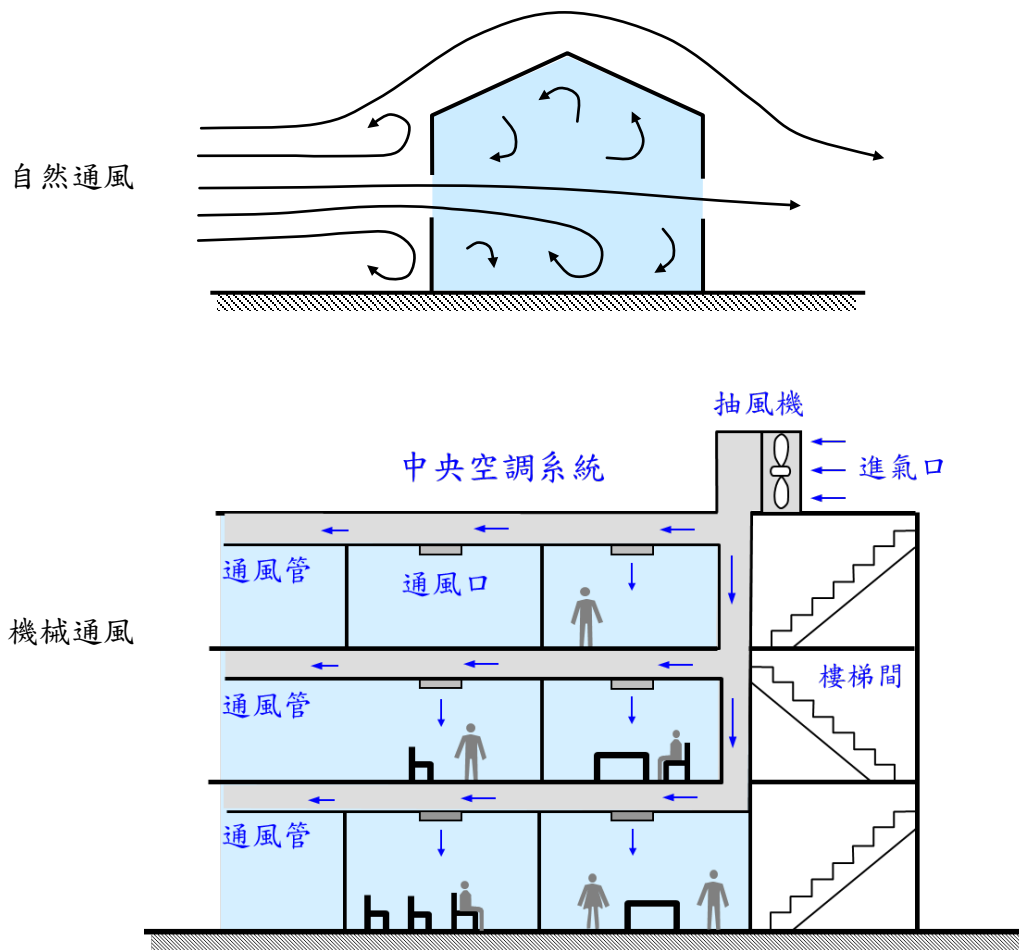


圖 1-5 自然通風和機械通風之示意圖

早期興建之建築物當時並無節能法規，故普遍存在耗能及不符生態環境之問題。黃國倉(2006)的研究指出：國內一般辦公大樓空調耗電佔建築能耗比率約為45%，長期累積所耗費的能源十分可觀。辦公大樓與百貨公司建築耗能設備平均用電量之比例，空調耗電佔建築能耗比率超過50%。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，每年節省的冷卻耗電為14~41 kWh/m²。以一棟10層樓辦公大樓為例，若每個層樓地板面積1000 m²，若每天開空調的時間8.0 hr，一年便可減少用電2.8~8.2億度電。因此建築師應該先計算該建築物的自然通風，當換氣率不足或室內氣溫可能不舒適時，才採用機械通風。

自然通風可依照其驅動力分為風壓通風和浮力通風兩種方式。以下分述之：

- (1)風壓通風：利用自然風力作用在建築上所造成的風壓差異，推動氣流流動而產生室內外空氣之交換。當建築物迎風面和背風面皆有通風開口(門窗)，則迎風面的開口為進風口，而背風面的開口為出風口，形成貫流通風(Cross ventilation)，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(One-side ventilation)，亦可造成自然通風，但通風效果較差(Chu et al., 2011)。當室外風速超過 1.5 m/s 時，風力即可促成建築物的換氣(江哲銘, 1997)。
- (2)浮力通風：當一棟建築物內有垂向的溫度差異，且在外牆的高低處皆有開口(門窗)，則室內的熱空氣會由高處的開口流出，而室外的冷空氣會由低處開口補充，利用浮力自然地將熱空氣排出，促使室內外的空氣上下對流與交換。

自然通風乃是利用自然界的風力和溫度差異驅使建築物內外空氣的流動和交換，若可達到足夠的換氣量和室內環境的舒適性，便不須使用耗費能源的通風機械。但自然通風受到許多因素的影響，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的影響。因此建築師在評估建築物的自然通風狀況，需要考量的因素較多。國內的建築物理環境之類的書籍大多以一個章節來定性地描述自然通風，並沒有完整地介紹自然通風量的計算方法。本手冊希望能推廣自然通風，讓國內建築師用簡易的方法來計算台灣常見建築物的自然通風量，亦可讓建築物使用者瞭解自然通風的原理與操作方式，自行開關建築物的門窗，有效地利用自然通風，達到建築節目的目的。

研究建築物通風和室內風場的方法可分為：(1)實場監測；(2)區塊模式；(3)計算流體動力學(CFD)模式；(4)風洞實驗。各有其優缺點(Chen, 2009; Etheridge, 2011)，以下分述之：

(1) 實場監測(Field observation)：

實場調查為找一棟真實的建築物，在建築物內外裝設量測風速、溫度、溼度的儀器，監測其變化一段時間，再分析實驗資料的變化。這是瞭解實際風場最直接、最具說服力的方式，但實場的室外風速、風向、溫度與時俱變，某一棟建築物的監測數據往往無法應用於其他建築物之設計，不易由監測結果深入瞭解通風現象背後的機制。除此之外，實場量測所需的人力、經費和時間較多。且建築物未興建之前，無法進行監測，故較少建築物採用此法研究其自然通風的狀況。

(2) 多區間模式(Multi-zone model)：

多區間模式將建築物內部空間依其隔間分為數個區塊(Zone)，將單一區塊當成一個完全混合(Fully mixed)的控制容積。依據質量不減定律，在區塊內空氣質量、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。因此計算在一段時間 Δt 之內，流入和流出區塊的物質總量便可得區塊內物質的平均濃度和溫度，譬如CONTAM、COMIS、NatVent、BREEZE等模式(Feustel, 1999; Dascalaki et al., 1999; Ren and Stewart, 2003)。此種模式又稱為網路模式(Network model)，其優點為計算簡單，可計算區塊內穩態下的通風量和濃度。但缺點為無法得知各個區塊內速度、濃度及溫度的分佈。

朱佳仁等(2011)發展了一個適用於台灣氣候條件的多區間自然通風計算模式TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model)，模式結合了台灣中央氣象局26個氣象觀測站1961~2008年的氣象資料(平均風速、盛行風向、氣溫、濕度)可計算各種建築物座向、室內隔間、開口位置、大小及是否有裝紗窗或百葉窗的風壓通風量和換氣率。通風模式所需之建築物表面風壓則利用風洞實驗室及壓力計量測得之，再使用二維的立方弧線法(Cubic Spline)內插求得建築物表面任意一點的壓力。此外TAIVENT模式利用牛頓-拉福森(Newton-Raphson)法求取各個房間的室內壓力及各開口的通風量，研究結果顯示若建築物表面的風壓係數為已知，可以利用TAIVENT模式計算多區間建築物的風壓通風量。本手冊便是結合多區間通風模式和經驗模式來計算建築物的自然通風量。

(3) 計算流體動力學(CFD)模式：

計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模式將室內、外空間格網化，依據連續方程式、那維爾-史托克(Navier-Stokes eqn.)方程式和擴散方程式，採用數值方法計算流場控制方程式的數值解，配合上適當的邊界和初始條件，求得各個格網點上的風速、壓力和濃度，此法又稱為全域模式。其優點為可以計算出流場的細部變化，但缺點為計算量大，模式參數眾多。若計算模式的設定參數、網格、收斂標準不正確，可能會得到似是而非的計算結果，因此必須與相同流況之實驗數據比對以驗證其正確性(Awbi; 2003; Chen, 2009)。

(4) 風洞實驗：

製作建築物的縮尺模型放置於風洞內，研究該建築物在不同室外風速、風向下的通風量。其優點為可以控制風速、風向、開口面積等，可以有系統地探討建築物的通風機制。且實驗數據較可靠，可以驗證物理模式或計算流體動力學(CFD)模式之預測結果。但缺點為儀器設備較昂貴，只有大學或研究機構才有大型的風洞設備可以進行建築物模型實驗。

而台灣建築物理環境的書籍以及大專院校建築系所在教建築物通風時，大多以定性描述的方式解釋自然通風的重要性，並未說明自然通風量的計算方式。因此，台灣的建築師在擬定建築物通風計畫時，大多不會針對該建築物計算其自然通風量，遑論使用計算流體動力學(CFD)數值模式或風洞實驗研究建築物自然通風的最佳策略。針對大型的公共建築物，自然通風量往往不足，故建築師大多依賴冷凍空調師設計所需的機械通風設備。但採用機械通風可能會過度設計，而耗費大量電力。部份建築師藉由經驗公式計算自然通風量，這些通風經驗式不一定適用於不同建築物，正確性較低。

內政部建築研所2015年版的「綠建築評估手冊 - 基本型」的附錄三「建築物採光通風效益與通風空調節能評估規範」有說明自然通風對建築物空調節能效益之計算公式，其內容依據李怡萱 (2014)使用CFD模式計算住宅式建築物七種不同室內隔間的風壓通風，分析其通風路徑和面積，區分臨窗通風面積和對流通風面積，提出自然通風潛力VP的經驗計算式，但李怡萱 (2014)並未計算該建築物的自然通風量。內政部營建署於民國108年12月頒佈之「建築物節約能源設計技術規範」的附錄三「建築物自然通風空調節能評估」以及2019年版的「綠建築評估手冊 - 基本型」修改自然通風潛力VP的計算公式，但並未說明建築物的自然通風量的計算方法，本手冊將補足此缺憾。

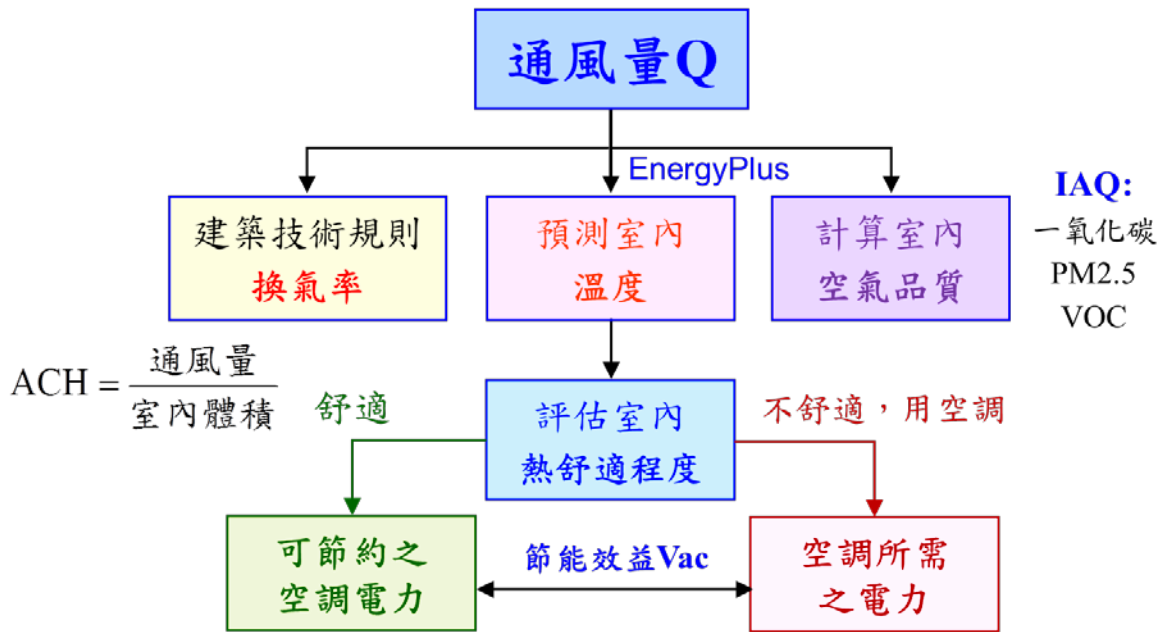


圖 1-6 建築物自然通風量之應用

圖1-2顯示估算建築物自然通風量的重要性，若針對某一棟建築物，依據當地的平均風速、盛行風向、建築物座向與開口面積預測其自然通風量，便可利用此自然通風量預估建築物的換氣率、室內溫度及污染物濃度。若自然通風已達最大的通風量，室內氣溫依然過高或換氣率不足，達到不舒適的狀況，則建築物必須機械通風或冷氣空調，再由使用冷氣的時間估算所耗的電力。若採用自然通風，室內氣溫可維持在舒適的狀況，無須使用機械通風，便可計算所節約的空調電力。若不知自然通風量，估算之節能效率便失之準確。

第二節 適用範圍和方法

台灣夏季濕熱的氣候狀況，使得許多建築物24小時地使用冷氣空調來維持建築物室內環境的舒適性。但是不分日夜地使用這些空調設備，亦會耗損大量的電力。若能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，將可達到建築節能之目的。因此建築師需要一個正確且容易使用的通風模式來計算自然通風狀況下的換氣率。

本手冊整理風壓通風與浮力通風的相關理論與計算公式，結合流體質量守恆原理、多區間通風模式和經驗模式，建構一個計算多區間建築物的自然通風量與換氣率的模式，並利用風洞實驗之數據及CFD模式來驗證通風模式之預測結果。自然通風量計算公式以Excel軟體來計算，建築設計者可以輸入建築物的外型、開口面積、當地

的平均風速、盛行風向等氣象資料，便可計算建築的自然通風量或換氣率，以設計出可利用自然通風之建築物。這本建築物自然通風設計手冊藉由實際建築物案例，來介紹自然通風量的計算方式，讓國內建築師和一般民眾了解自然通風量的設計概念，祈望建築師能有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出真正節能的建築物。並讓建築物使用者瞭解自然通風的操作方式與時機，住戶可依據其需求與室內外的氣候狀況，自行控制建築物的門窗的開闔，來調節自然通風量，使得室內環境達到舒適，並降低建築物的耗能。

本手冊中所舉的建築物案例皆為簡單的矩形外型之建築物，因為矩形外型建築物的外牆風壓有實驗量測值，故計算風壓通風量較容易。雖然其他外型之建築物依然可以使用本手冊中的通風量計算模式，但特殊外型之建築物的外牆風壓不易取得，故無法正確計算其風壓通風量。同樣地，當建築物室內隔間或內部熱源的分布十分特殊，或複雜地形中的建築物或基地周圍有其他建築物的阻礙，則該建築物的自然通風量的評估需要尋求專家之諮詢。

本手冊共包括十四章，主要章節內容為：第一章為緒論，說明研究的背景、研究目的及各章的內容；第二章介紹建築物通風的研究及各種通風計算模式；第三章介紹自然界風場及六都的風速、風向資料；第四章藉由真實建築物案例介紹室內無隔間之貫流通量的計算方法；第五章為不同風向之風壓通風計算案例；第六章為室內有隔間之風切通風的示範案例；第七章為三側三開口之風壓通風示範案例；第八章為屋頂有開口之廠房貫流通風示範案例；第九為住宅之風壓通風示範案例；第十為透天式建築浮力通風示範案例；第十一章為辦公空間之風壓通風案例；第十二章為中小學教室之風壓通風示範案例；第十三章為宿舍之風壓通風示範案例；第十四章為自然通風 Excel 計算檔使用方式。

第三節 基本名詞定義

開口：建築物外牆及內部可以讓空氣自由流動的開孔或縫隙，譬如門、窗和抽風機的通風口等，本手冊僅計算開口斷面積大於 0.1 m^2 的開口。

滲隙風：由門縫、窗縫隙流入或流出建築物的通風量，在一般的大氣狀況下，流經門縫、窗縫的通風量遠小於門窗全開之通風量，本手冊不計算其通風效果。

可對流開口：建築物外牆及內牆上的門及窗，氣流可由一個開口自由地流經另一個開口而流出該區塊。一戶住宅內部的各房間的門或窗視為可對流開口，廚房聯通到居室及陽台之門窗亦為可對流開口。經常關閉之門扉與自動門則不可視為對流開口，譬如由公共空間(如樓梯間)進入到私人空間內部(如住宅)之間的門便不屬於可對流開口。而一般建築物內部的廁所多採用機械強制通風，或有小型的對外窗戶，其對建築物整體自然通風的影響很小，可忽略不計。一般家庭廚房的抽油煙機屬於局部機械通風，對建築物整體的自然通風影響不大，亦可忽略不計。

單側開口：建築物內部的區塊只有一個在外牆上的開口或僅有一個對內的開口，空氣在該開口有進有出，可將一段時間之後的平均換氣率做為其通風量。

開口面積：實際氣流可以通過的斷面面積。譬如橫拉窗的開口面積需要扣除玻璃遮蔽之面積，因此橫拉窗的最大開口面積為窗戶總面積的50%。

開口率：建築物外牆上總開口面積與外牆面積之比率。完全密閉之建築物，開口率為0；無牆的涼亭的開口率為1.0。

流量係數：計算氣流通過開口通風量之無因次係數，其值介於0~1.0，與開口是否有裝設紗窗、百葉窗、外推窗有關。

室外風速U：在建築物外部不受其他建築物干擾之風速。靠近地表之風速會隨高度而變，計算風壓通風時必須換算該開口高度處之室外風速，常用單位為公尺每秒[m/s]。

外牆風壓：室外風速施予建築物外牆上的時間平均風壓力，與風向、建築物外型有密切的關係，與建築物構造(木構造、磚造、混凝土構造)無關。常用單位為 $[\text{N}/\text{m}^2]$ 、 $[\text{kgf}/\text{m}^2]$ 或[psi]。

風壓係數：外牆風壓除以空氣密度和室外風速平方得之無因次風壓，可由風洞之建築模型實驗量測得。一般而言，建築物迎風面外牆的風壓係數為正值(高於大氣壓力)；背風面外牆為負值(低於大氣壓力)。譬如，矩形建築物迎風面的風壓係數介於0.5~0.9；背風面外牆風壓係數介於-0.60~-0.10，隨建築物高度、寬度而變。

室內氣壓：當建築物外牆有開口且建築物外部受到風力作用時，會造成室內空氣壓力偏離室外的大氣壓力。當室外風速為零時，室內氣壓等於室外的大氣壓力(亦即相對壓力為零)。

有效開口面積 A^* ：貫流通風發生時，由迎風面、背風面開口面積、流量係數合起來計算得之實質的通風面積。

盛行風向：在建築基地發生機率最大的風向，以正北為零。

風向角：室外風向與建築物外牆上開口之間的角度。當風向垂直於開口時，風向為零；當風向平行於開口時，風向為 90。

風壓通風：又稱為風力通風，利用自然風力作用在建築上所造成的風壓差異，推動氣流流動而產生室內外空氣之交換。

風切通風：室外風向平行於開口，在開口處的風切紊流造成的室內外空氣交換。

貫流通風：建築物迎風面和背風面(或側面)皆有通風開口，兩開口的壓力差異推動空氣由迎風面的開口流入，由背風面的開口流出所形成之通風。

單側通風：建築物僅在同一側的牆面上有開口，室內外的壓力差異或風切紊流所造成的通風。

浮力通風：當一棟建築物內部有垂向的溫度差異，且在外牆高處和低處皆有開口，則室內的熱空氣會由高處的開口流出，而室外的冷空氣會由低處開口流入補充，利用空氣的熱浮力地將熱空氣排出，並促使室內外的空氣上下對流。

自然通風：利用自然界的風力或建築物內外的溫度差異驅使空氣在室內外的流動和交換。

通風量 Q ：單位時間之內流經單一開口的空氣體積流量，常用單位為立方公尺每秒 [m^3/s]。

總通風量 ΣQ ：建築物之內某個區塊(房間)之內，經由不同開口，所有流入此區塊的空氣流量(不計流出)。譬如一個房間有四個開口，兩個開口在迎風面，一個在側面，另一個在背風面，則總通風量為流經迎風面兩個開口風量之總和。

無因次通風量 Q^* ：通風量 Q 除以室外風速 U 和有效開口面積 A^* 。

小時換氣率 (ACH)：一小時之內，室內空氣被置換的次數。其計算公式為流經該區塊的總通風量除以該區塊內部的體積，單位為每小時 [1/hr]。

平均換氣率：一棟建築物之內，各區塊之內小時換氣率之算數平均值。

第二章 自然界風場

第一節 大氣邊界層流

地表空氣的流動會受到地表邊界的影響，水平向風速的垂向剖面成不均勻分佈，稱為大氣邊界層(Atmospheric Boundary Layer)。大氣邊界層的厚度約為200公尺~1000公尺之間，其中空氣的流動受到地表的摩擦阻力、溫度差異和地球自轉的影響，較為複雜。大氣邊界層之上的對流層，受地表影響較小，地球自轉的影響較大，水平流速成均勻分佈，稱為自由流(Free stream)。因為大部份的建築物、人類活動皆在大氣邊界層之中，故建築師必須對大氣邊界層中的風場有所認識。

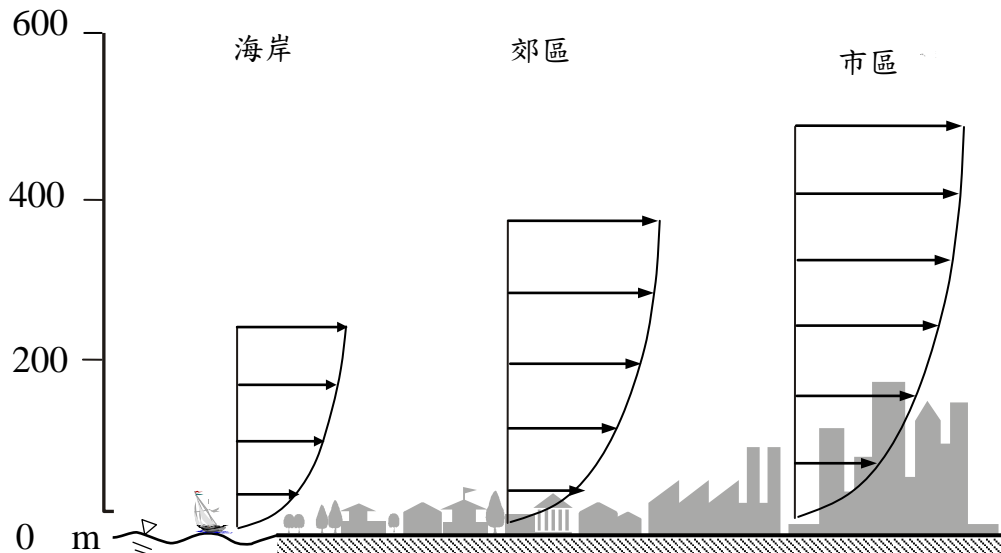


圖2-25不同地況之平均風速剖面

一般而言，地表風場可依據地表溫度變可分為：穩定、不穩定及中性大氣狀況。大氣穩定度對地表附近的污染物擴散、和熱島效應的影響較大，對於高風速下，結構物所受的風力負載影響較小，故研究結構物與風場之間的交互作用時往往忽略穩定度的影響，僅以中性大氣邊界層模擬之。換言之，平均風速的垂向分佈可以較簡單的對數或指數剖面表示：

(a) 對數剖面(Logarithmic profile)：

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - z_d}{z_o} \quad (2-59)$$

(b) 指數剖面(Power law profile)：

$$\frac{U(z)}{U_o} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad (2-60)$$

其中 U_o 為邊界層外之風速，又稱為梯度風速(Gradient velocity)， δ 為梯度高度(Gradient height)， α 為指數。梯度高度與指數視地表的地況而定，表2列舉四種不同的地況的粗糙程度之分類：

(a)地況A：大城市之市中心或該地區水平距離至少800公尺或主建築物高度10倍（兩者取較大值）的範圍內大部分(50%以上)的建築物高度皆大於20公尺的地區。

(c)地況B：市郊、小市鎮或該地區水平距離至少500公尺或主建築物高度10倍的範圍（兩者取較大值）的範圍內大部分(50%以上)的建築物高度介於10~20公尺的地區。

(d)地況C：地勢平坦開闊之草原，或地面零星散佈的地物高度皆小於10公尺的地區，或海岸地區由水面方向吹過來的強風（風速大於10 m/s）。

(d)地況D：平坦無障礙物之海岸地區或湖岸地區，微風由水面方向吹過來，距海岸線500公尺或主建築物高度10倍的範圍（兩者取較大值）屬此種條件，方適用此種地況。

表2- 1不同地況的邊界層高度與指數

地況分類	地況特性	指數 α 值	δ (m)	I (%)
地況 A	大城市之市中心區	0.32	500	25 ~ 50
地況 B	郊區、小市鎮	0.25	400	20 ~ 30
地況 C	開闊之平原	0.15	300	15 ~ 20
地況 D	地勢平坦之海岸地區	0.11	215	10 ~ 15

第二節 台灣六都的風場

中央氣象局在台灣地區與離島共設有32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。除此之外，無人之自動氣象站約有400個測站。氣象測站名稱、站號海拔、風速計距離當地地面高度、設立時間等資料可在網路上查得。因此建築師可以向中央氣象局取得最靠近建築基地之氣象測站的風速、風向觀測資料進行統計分析，計算該地區年平均風速與盛行風向(發生機率最大之風向)。再利用指數律將氣象站的年平均風速轉換成建築物開口高度處的風速 $U(z)$ ：

$$\frac{U(z)}{U_{\text{met}}} = \left(\frac{z}{z_{\text{met}}} \right)^{\alpha} \quad (2-61)$$

式中 H_{met} 為氣象測站的風速計距離地面之高度， z 為建築物開口位置距離地面之高度， α 為測站所在位置之地況指數，可參考建築耐風設計規範與解說。

風向為風在水平方向的角度，一般可將風向分為 16 個方位，以正北方為 0° ，順時針方向將風向分為每 22.5° 間隔一個方位：北(N)、北北東(NNE)、東北(NE)、東北東(ENE)、東(E)、東南東(ESE)、東南(SE)、南南東(SSE)、南(S)、南南西(SSW)、西南(SW)、西南西(WSW)、西(W)、西北西(WNW)、西北(NW)、北北西(NNW)。當風速小於 0.3 m/s 時，風標不動的狀況稱為靜風(Calm)。計算各地風速、風向所使用之

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，本手冊建議風速資料至少需要有 5 年以上逐時的風速、風向記錄，來計算當地的平均風速和各風向的發生機率。

圖2-2~2-7為台灣六都的風花圖，表2-2為其平均風速與盛行風向。

表 2-2 台灣六都的平均風速與盛行風向

地區	平均風速(m/s)	盛行風向	發生機率
台北市	3.15	東風、東北及東北東	52 %
新北市	2.02	東北東、南南西、及東北	61 %
桃園市	3.78	東北風、東北東及北北東風	48%
台中市	1.61	北風、北北東及北北西	37 %
台南市	3.09	北風、北北東及北北西	51 %
高雄市	2.26	北風、西北、西北西、北北西	42%

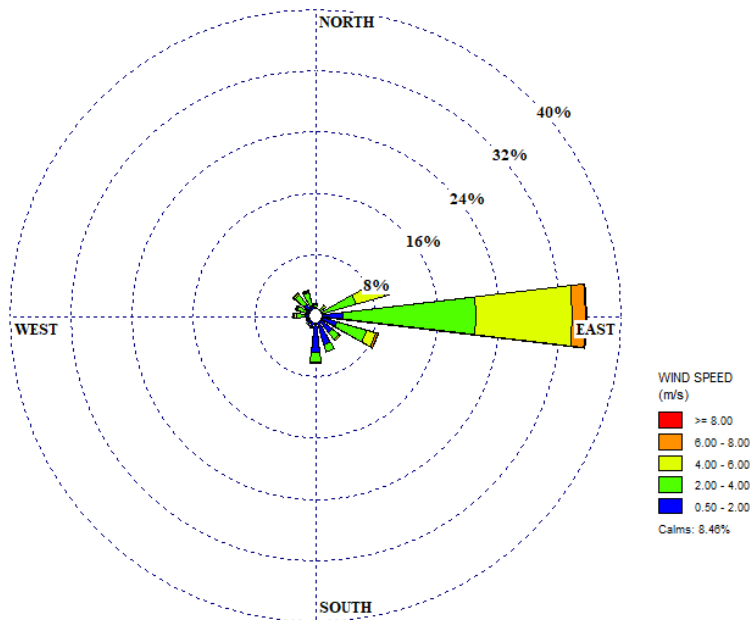


圖2-26 台北市全年的風花圖(2000-2008)

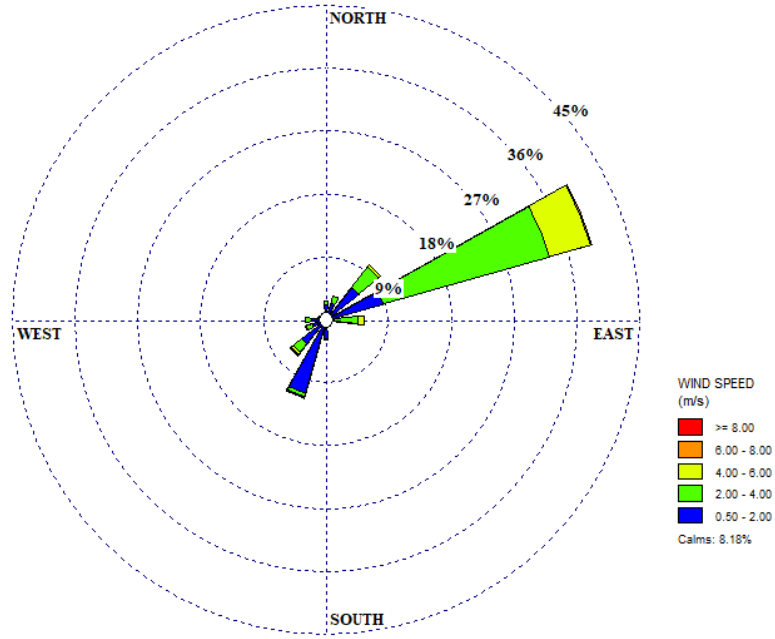


圖 2-27. 新北市全年的風花圖(2000 - 2008)

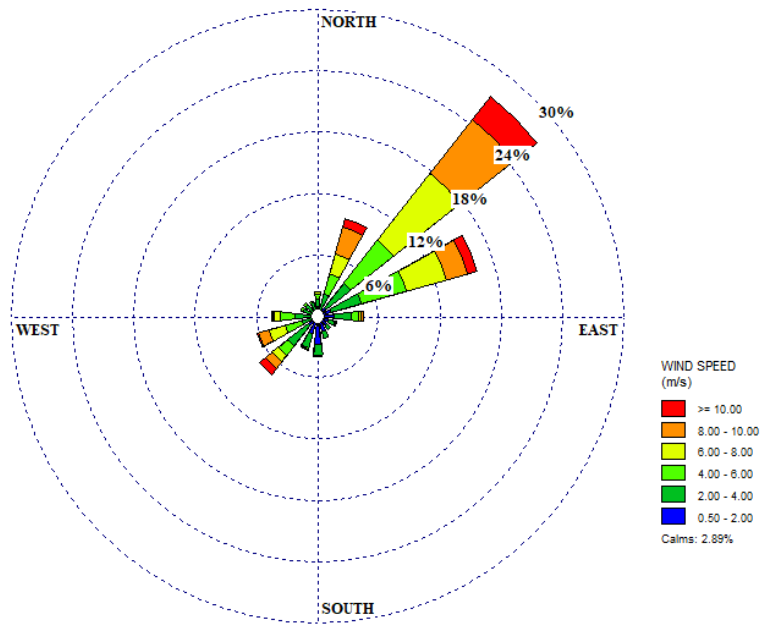


圖2-28 桃園市全年的風花圖(2018)

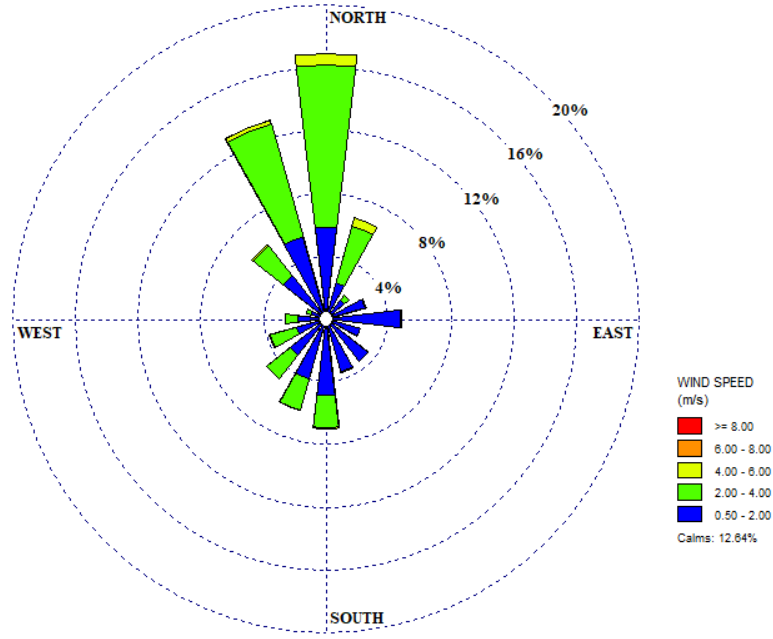


圖2-29. 台中市全年的風花圖(2000-2008)

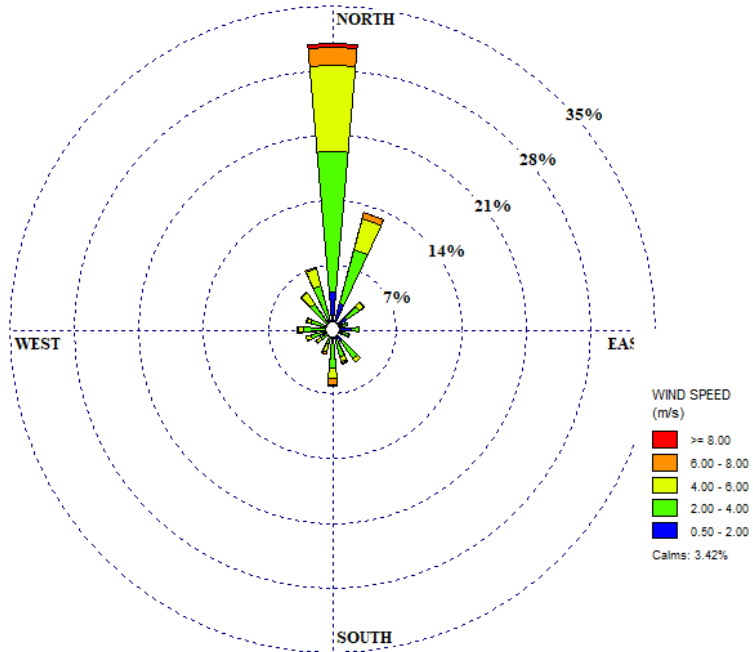


圖2-30. 台南市全年的風花圖(2000-2008)

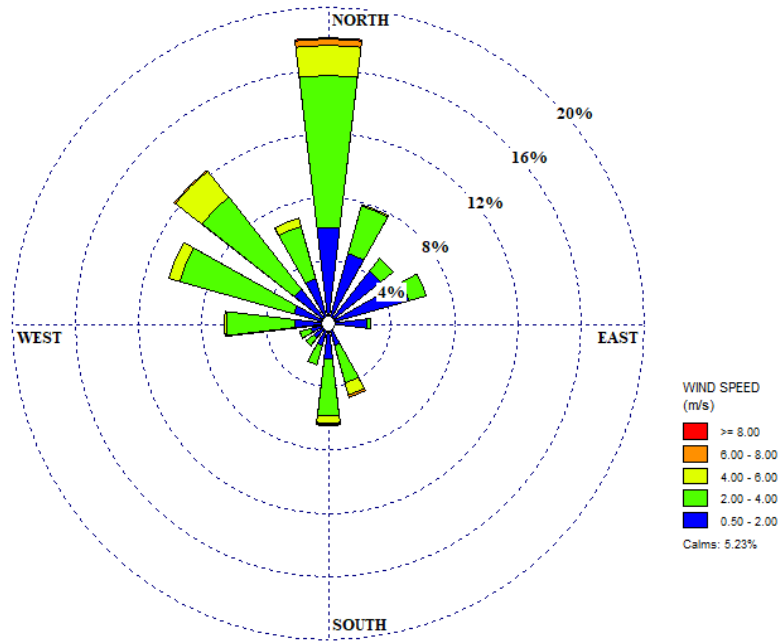


圖2. 31. 高雄市全年的風花圖(2000-2008)

第三章 通風計算模式

建築物的自然通風受到通風驅動力(室外風速、風向)、開口面積、位置、室內隔間形式等因素的影響，無法以單一公式計算。本章先介紹室外風場，再依據室內隔間形式，將建築物通風計算模式區分為單區間模式、多區間模式，以下分述之：

第一節 單區間通風模式

此節所描述的风壓通風模式，針對建築物室內無隔間之單區間(Single zone)的风壓通風，可依據流體力學的伯努利原理(Etheridge and Sandberg, 1996; Linden, 1999)，用孔口方程式(Orifice equation)計算流經過建築物對外門窗開口的通風量：

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}}$$

(3-23)

式中A為開口面積， $|\Delta P| = |P_e - P_i|$ 為室外和室內壓力 P_i 的差值的絕對值， ρ 為空氣密度， C_d 為流量係數(Discharge coefficient)。流量係數 C_d 與開口是否有裝設紗窗、百葉窗、外推窗(推射窗)有關。圖3.1為風洞實驗量測得之紗網、百頁窗之流量係數(朱佳仁等, 2009)。無紗網、無百頁窗流量係數最大，外推窗(推射窗)的通風量最小。但室內壓力 P_i 往往是未知數，故此式較難直接應用於風壓通風量之計算。

當門窗關上但仍有隙滲時，室外的空氣仍可能因為壓差而由門窗的縫隙滲入，此現象稱為風滲(Air infiltration)或隙縫風，流況大多屬於層流，其通風量：

$$Q = \frac{Ad^2}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

(3-24)



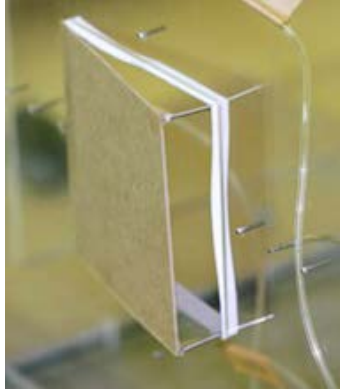
		
百葉窗 $C_d = 0.50$	紗窗 $C_d = 0.60$	外推窗 $C_d = 0.20$

圖3- 6紗網窗、百葉窗、外推窗之流量係數

式中 d 為開口的間隙， L 為開口在流向上的長度， μ 為空氣的動力黏滯係數。隙縫風的通風量小。當建築物在外牆上門窗大開時，風滲現象可忽略不計。綜合以上二式，通風量可以下式計算：

$$Q = kA(\Delta P)^n \quad (3-25)$$

式中 k 為流量係數，指數 n 會隨流況、開口大小等因素而定，約為 $0.6 \sim 0.7$ (Awbi, 2003)。

當一棟建築物在迎、背風面各有一個對外開口時，則流經開口的通風量必須滿足質量守恆理論，流入的風量等於流出的風量：

$$\rho Q_w = \rho Q_L \quad (3-26)$$

下標 1 、 2 分別代表迎風面和背風面。空氣密度 $\rho = (\rho_i + \rho_e)/2$ 為室內、室外空氣密度的平均值。在一般大氣壓力狀況下，溫差不大時，室內外空氣密度差異極小， $\rho_e = \rho_i$ 。故：

$$Q_w = Q_L \quad (3-27)$$

流經開口的通風量可利用孔口方程式(orifice equation)來計算：

$$Q_w = C_{dw} A_w \sqrt{\frac{2|\Delta P_1|}{\rho}} \quad Q_L = C_{dL} A_L \sqrt{\frac{2|\Delta P_2|}{\rho}} \quad (3-28)$$

下標 w 代表迎風面(Windward)， L 為背風面(Leeward)， A 為開口面積， C_d 為流量係數。在建築物內外有溫差，室內屬於完全混合的狀況下，空氣會因為熱浮力由低處開口流入，高處開口流出。故建築物開口處內外的壓差為：

$$\Delta P_1 = P_w + P_i - \frac{\Delta T}{T_e} \rho g z_1 \quad (3-29)$$

$$\Delta P_2 = P_L + P_i - \frac{\Delta T}{T_e} \rho g z_2 \quad (3-30)$$

其中 P_w 、 P_L 分別為室外風速施予迎風面和背風面外牆的動壓力； P_i 為室內的氣壓； z_1 、 z_2 分別為低處開口、高處開口離地面的高度； g 為重力加速度； $\Delta T \rho g z / T_e$ 為在高度 z 處因為室內外溫差 ΔT 所造成的靜壓差異(又稱為熱壓)。帶入質量守恆 $Q_w = Q_L$ 可得：風向垂直於迎風面開口的通風量：

$$Q_w = A^* \left[\frac{2|P_w - P_L|}{\rho} + \frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} \quad (3-31)$$

其中 A^* 為有效開口面積(Effective opening area)：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} \quad (3-32)$$

當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 的狀況，室內外溫差 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ，高低處開口的高度差 10 m 時，風壓通風量約等於熱浮力通風量。當室外風速 $U = 0$ ， $P_w = P_L = 0$ ，通風由熱浮力所主導，因室內外溫差所造成的通風量：

$$Q_1 = A^* \left[\frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} \quad (3-33)$$

當室外風速 $U > 3.0 \text{ m/s}$ 的狀況，室內外溫差 $\Delta T < 5^\circ\text{C}$ ，高低處開口的高度差 $\Delta z < 3 \text{ m}$ 時，風壓通風量遠大於熱浮力通風量，通風量可以：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} \quad (3-34)$$

式中 $C_{p1} = (P_1 - P_o) / 0.5 \rho U^2$ 為外牆開口處的風壓係數，為無因次係數； P_o 為參考壓力，一般為不受建築物干擾處的大氣壓力。

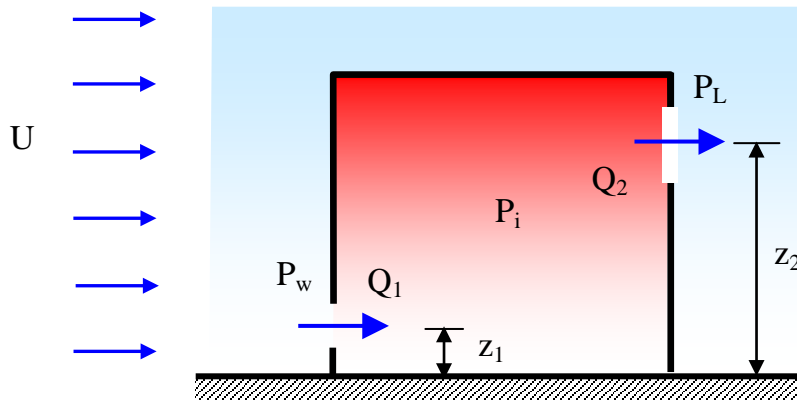


圖3-7 單區間雙開口貫流通風之示意圖

建築物外牆的風壓係數受建築物外型、位置的影響。矩形建築物迎風面外牆的風壓係數為正值(高於大氣壓力)，其值介於0.5~0.9；背風面外牆為負值(低於大氣壓力)，其值介於-0.10 ~ -0.60。可由風洞模型實驗或可靠的計算流體動力學CFD模式計算之。上式說明通風量與室外風速U和對外開口面積A成正比，室外風速和開口面積愈大，通風量愈大。

當建築物迎風面、背風面各有許多個開口，其通風量亦須遵守連續方程式：

$$\sum Q_w = \sum Q_L \quad (3-35)$$

假設外牆的風壓均勻分佈，則風壓係數 C_{p1} ， C_{p2} 為定值，利用孔口方程式可得總通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2|P_1 - P_2|}{\rho_e} \right]^{1/2} = U \cdot A^* \left[\frac{|C_{p1} - C_{p2}|}{\rho_e} \right]^{1/2} \quad (3-36)$$

其中 A^* 為多開口之有效開口面積(Effective opening area)：

$$A^* = \frac{\sum C_{dwi} A_{wi} \sum C_{dlj} A_{Lj}}{\left[(\sum C_{dwi} A_{wi})^2 + (\sum C_{dlj} A_{Lj})^2 \right]^{1/2}} \quad (3-37)$$

下標i、j分別為迎風面和背風面開口的數目， A_w 為迎風面(Windward)開口面積， A_L 為背風面(Leeward)開口面積。開口愈多，開口面積愈大，則有效開口面積 A^* 愈大，通風量Q亦愈大。因此建築物面對當地盛行風向的外牆上宜有一個大型開口(如落地

窗)，且背面風牆或側牆也有對外之開口，可造成貫流通風，通風量大。若建築物使用者覺得通風量過大，可自行開闔對外門窗來控制通風量。

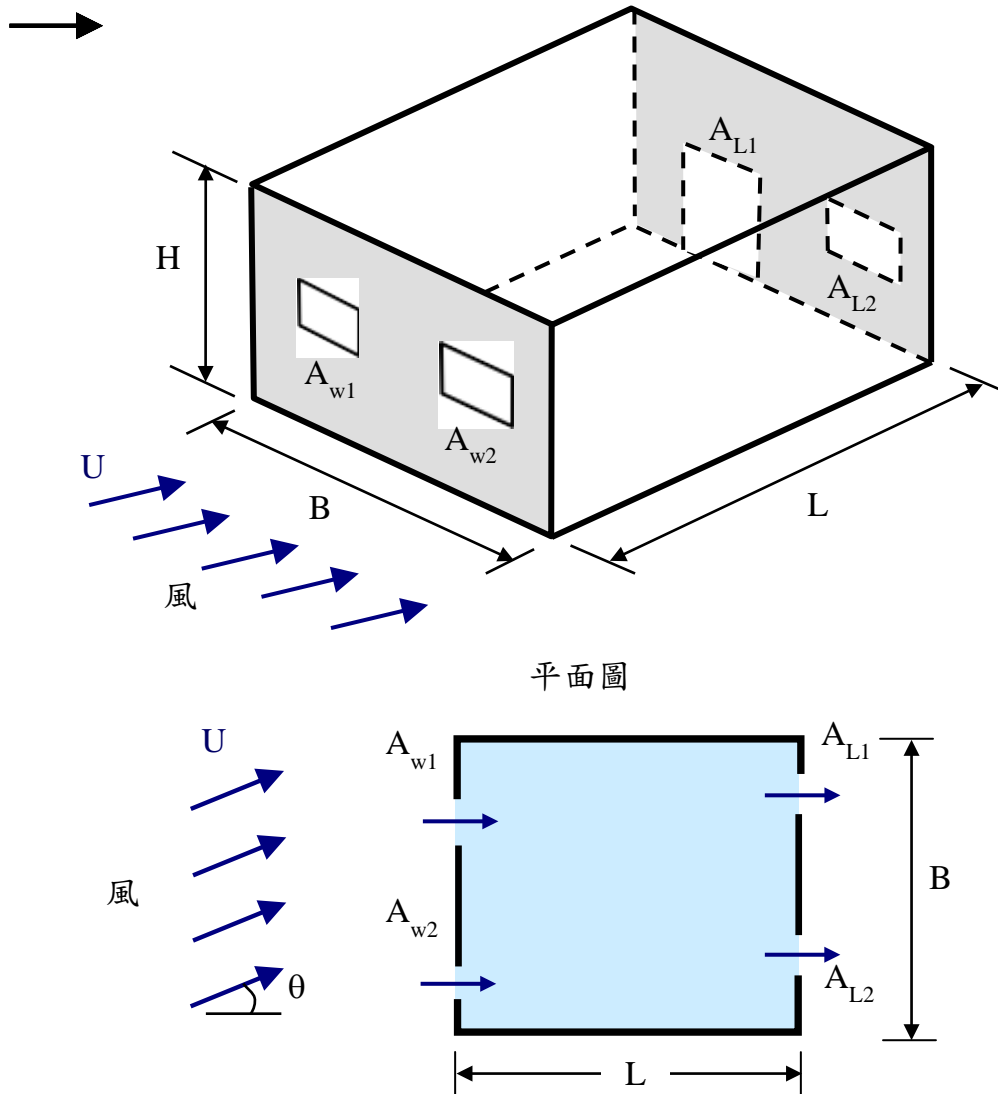


圖 3-8 單區間多開口建築物之示意圖

第二節 不同風向之貫流通風

以上為風向垂直於建築物開口($\theta = 0^\circ$)的貫流通風量計算方式，依據 Chu et al. (2011)風洞實驗和示蹤劑濃度量測結果顯示：當風向與開口夾一個角度時，風壓通風量可以用餘弦定律(Cosine law)來計算風向不正對開口的通風量：

$$Q(\theta) = Q_0 \cos \theta \quad (3-38)$$

式中 Q_0 為風向角 $\theta = 0^\circ$ 時的貫流通風量。如圖3.4所示，當風向角 $\theta = 0^\circ$ 時，貫流通風量最大；風向角 $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ 之間，通風量隨著風向角的增加而遞減。這是因為當風向角不為零時，只有正對開口的風速分量 $V\cos\theta$ 才會流入開口，平行於建築物開口的風速分量 $V\sin\theta$ 並不會造成貫流通風。當風向與開口的夾角介於 -45° 或 45° 時，通風量為貫流通風量 Q_0 (風向角 $\theta = 0^\circ$)的70%。

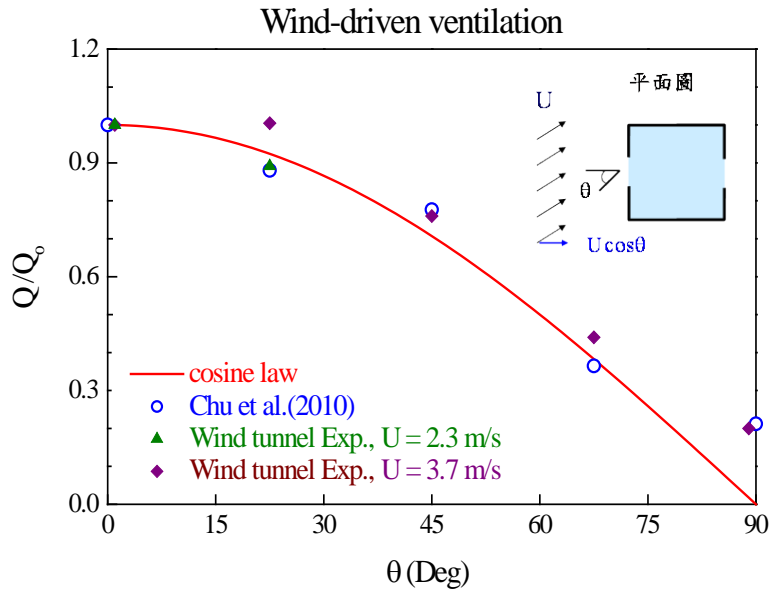


圖 3-9 不同風向角之風壓通風量

當風向平行於建築物開口(風向角 $\theta = 90^\circ$)時，如圖 3.5 所示，開口的風切(風剪力)所產生的紊流還是會促使室內外的空氣交換，但通風量遠小於風向角 $\theta = 0$ 的貫流通風量。Chu et al., (2011)利用風洞模型實驗與示蹤劑濃度衰減法量測建築物模式內的濃度變化，發現：當風向平行於開口，對側各一個開口(雙側雙開口)的通風量：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.077 \quad (3-39)$$

式中 U 為室外風速， A 為開口面積。當風向角 $\theta = 90^\circ$ ，只有單側一個開口的風切通風量為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.018 \quad (3-40)$$

當風向角 $\theta = 0^\circ$ ，風向垂直於建築物開口，只有一個開口在迎風面，通風量為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.025 \quad (3-41)$$

如圖3-6所示，以上兩式不會隨室外風速而變，且建築物雙側皆有開口的風切通風量遠大於單側單開口通風量，這是因為雙開口的壓力變化幅度較大，促使室內外空氣交換速率較高。在同一側有兩個開口的風切通風量(Chu et al., 2015)為：

$$Q^* = \frac{Q}{UA} = 0.053 \quad (3-42)$$

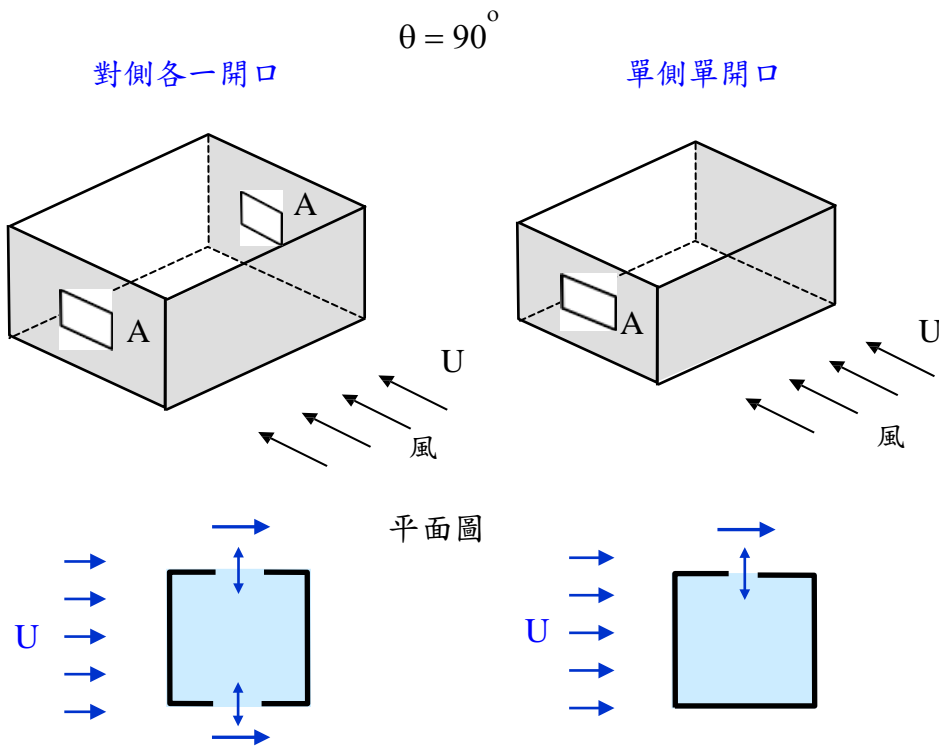


圖3-10 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖

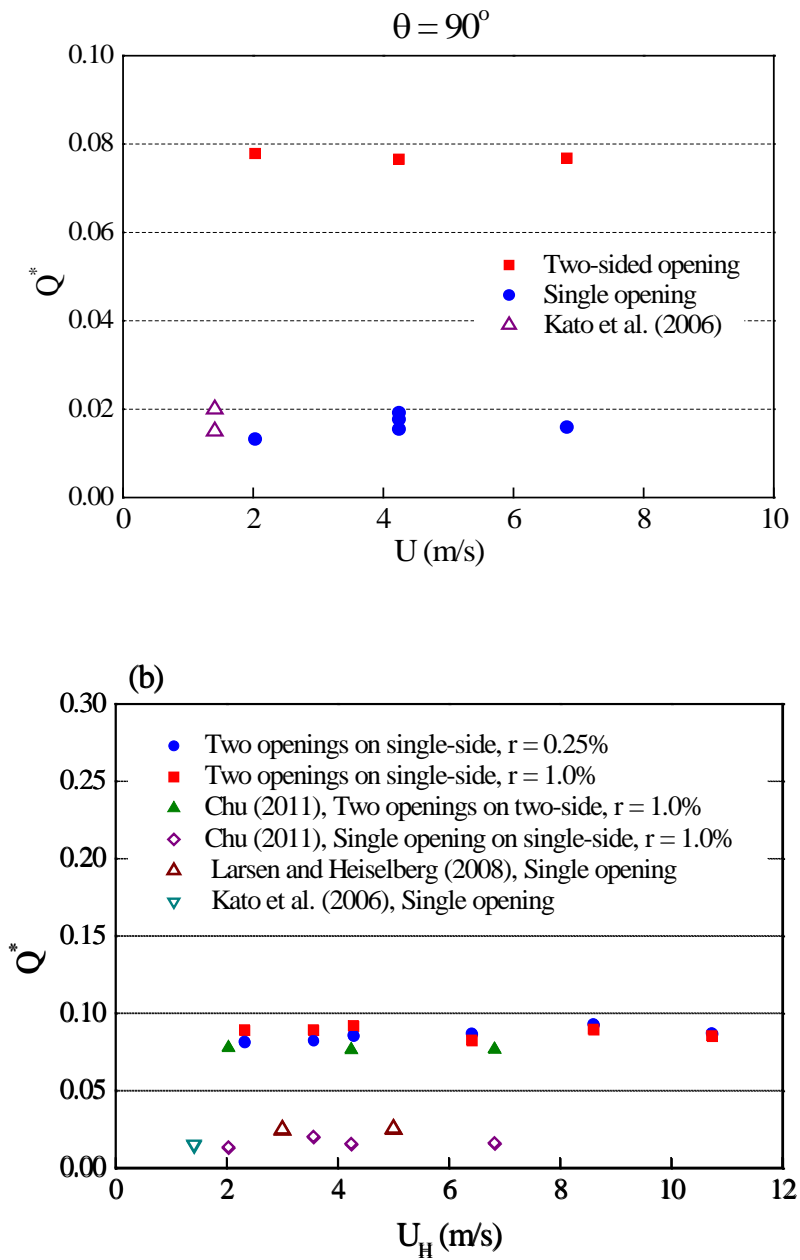


圖 3-11 單側單開口及雙側雙開口的風切通風量

圖3-8顯示不同風向角狀況下，建築物單側有雙開口通風量的實驗量測結果。由此圖可看出：雙開口在迎風面(風向角 $0 < \theta < 90$)的通風量遠大於開口在背風面(風向角 $90 < \theta < 180$)的通風量。且建築物內無隔間的通風量大於室內有隔間的通風量。

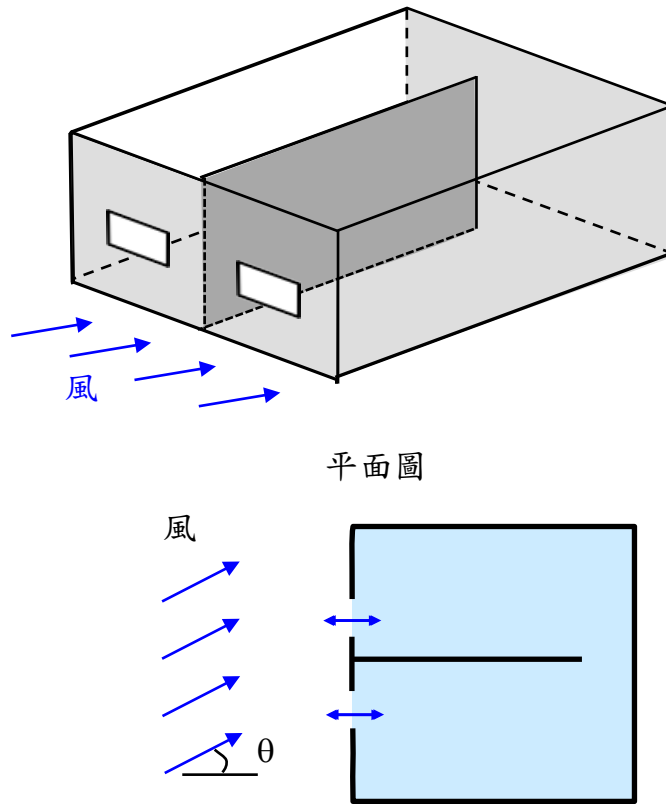


圖3-12 有室內隔間雙開口建築物通風之示意圖

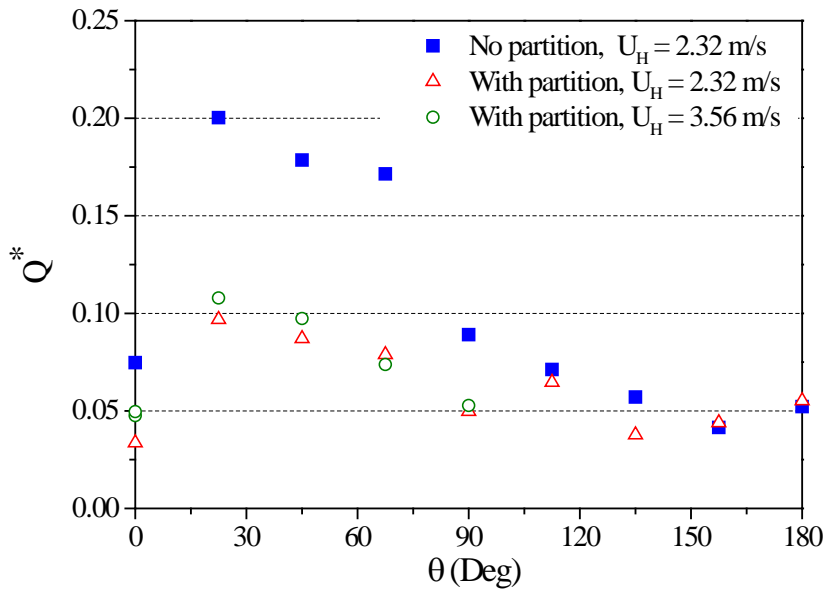


圖3-13 室內隔間對雙開口建築物通風量之影響

第三節 多區塊貫流通風模式

當一棟建築物迎風面、背風面各有一個開口(Opening)，迎風面牆上的開口面積為 A_1 ，背風面牆上的開口面積為 A_2 。室內隔成兩個房間，兩個房間中有一個開口，開口面積為 A_i ，如圖 3.9 所示。開口面積比：

$$A_{r1} = \frac{A_1}{A_i} \qquad A_{r2} = \frac{A_2}{A_i} \qquad (3-43)$$

風壓通風的通風量計算公式為：

$$Q = C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}} \qquad (3-44)$$

式中 A_o 為開口面積， ΔP 為壓差， ρ 為空氣密度， C_d 為開口的流量係數。依據流體力學的連續方程式：

$$\rho Q_1 = \rho Q_i = \rho Q_2 \qquad (3-45)$$

式中 Q 為通風流量，下標 1 代表迎風面開口，下標 2 代表背風面開口，下標 i 代表室內。在等溫(Isothermal)的狀態下，空氣密度 ρ 為定值，故：

$$Q_1 = Q_i = Q_2 \qquad (3-46)$$

代入通風量公式：

$$C_{d1} A_1 \sqrt{|P_{e1} - P_{i1}|} = C_{di} A_i \sqrt{|P_{i1} - P_{e2}|} \qquad (3-47)$$

$$C_{di} A_i \sqrt{|P_{i1} - P_{i2}|} = C_{d2} A_2 \sqrt{|P_{i2} - P_{e2}|} \qquad (3-48)$$

式中 P_{i1} 為第一個房間的室內風壓， P_{i2} 為第二個房間的室內風壓， P_{e1} 為迎風面牆上的室外風壓， P_{e2} 為背風面牆上的室外風壓。共有 5 個未知數(2 個壓力 P ，3 個流量 Q)，5 個方程式(2 個連續方程式，3 個通風量方程式)。若迎風面、背風面開口皆為小型開口，室外風壓不受開口影響。

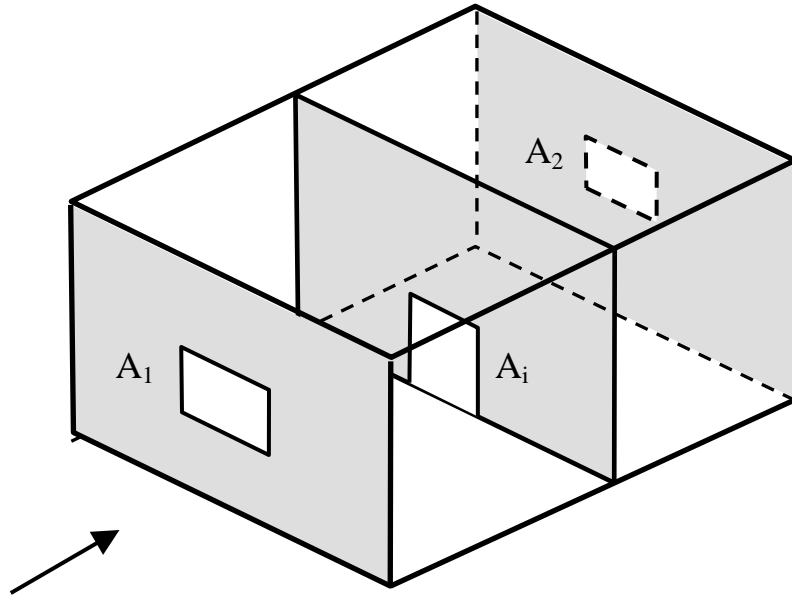


圖3-14 有室內隔間之建築物貫流通風之示意圖

以上兩式整理可得室內外壓力平衡方程式：

$$P_{e1} = \frac{(1 + A_{r1}^2 C_{dr1}^2)}{A_{r1}^2 C_{dr1}^2} P_{i1} - \frac{P_{i2}}{A_{r1}^2 C_{dr1}^2} \quad (3-49)$$

定義流量係數比：

$$C_{dr1} = \frac{C_{d1}}{C_{di}} \quad C_{dr2} = \frac{C_{d2}}{C_{di}} \quad (3-50)$$

由上式可得：

$$P_{i2} = \frac{P_{i1}}{1 + A_{r2}^2 C_{dr2}^2} + \frac{A_{r2}^2 C_{dr2}^2}{1 + A_{r2}^2 C_{dr2}^2} P_{e2} \quad (3-51)$$

可定義無因次之參數：

$$\alpha_1 = A_{r1} C_{dr1} \quad \alpha_2 = A_{r2} C_{dr2} \quad (3-52)$$

整理可得無因次之開口平均風速等於：

$$\frac{u_1}{U_o} = C_{d1} \left[\frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_2^2} (C_{p1} - C_{p2}) \right]^{0.5} \quad (3-53)$$

換言之，若室外風速 U_o 、室外風壓係數 C_{p1} 、 C_{p2} 、開口的面積 A_1 、 A_2 、 A_i ，流量係數 C_{d1} 、 C_{d2} 、 C_{di} 為已知數，可求得通風量 Q 和開口平均風速。

若開口面積 $A_1 = A_2 = A_i$ ，且開口的流量係數 $C_{d1} = C_{di} = C_{d2}$ ，則 $\alpha_1 = 1$ ， $\alpha_2 = 1$ ，室內外壓力平衡方程式可簡化為：

$$Q^* = C_{d1} \left[\frac{|C_{p1} - C_{p2}|}{3} \right]^{0.5} \quad (3-54)$$

比較此式和(15)式可知：在相同室外風速、門窗面積，有隔間的建築物自然通風量小於無隔間建築物的通風量。建築物外牆的風壓可以無因次之壓力係數表示：

$$C_p = \frac{P_1 - P_o}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3-55)$$

式中 U 、 P_o 為室外不受建築物影響處之風速、壓力， ρ 為空氣密度。

第四節 多區塊多開口模式

以一棟矩形建築物為例，在單一樓層隔成 n 個房間，每個房間有 m 個開口，如圖 3-10 所示。當室外風速 U 、外牆風壓係數 C_{pe} 、各個房間的開口面積 A 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 。

依據質量守恆定律，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.)：

$$\sum_{j=1}^m \rho Q_j = 0 \quad (3-56)$$

其中 m 為該房間開口的數目，下標 j 表示第 j 個開口。在氣壓、氣溫變化很小的狀況下，空氣密度 ρ 可視為定值，故：

$$\sum_{j=1}^m Q_j = 0 \quad (3-57)$$

流入房間的流量為正，流出為負。各開口的流量皆以孔口公式(Orifice eqn.)計算：

$$Q_j = C_{dj} A_j \left[\frac{2(P_j - P_{ri})}{\rho} \right]^{0.5} \quad (3-58)$$

其中 P_{ri} 表示第 i 個房間的室內壓力 (Internal pressure)。帶入上式可得：

$$\sum_j^m C_{dj} A_j (P_j - P_{ri})^{0.5} = 0 \quad (3-59)$$

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。可利用牛頓-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：

$$P_r = P_1 + \Delta_1 \quad (3-60)$$

其中 Δ_1 表示第 1 個室內壓力的修正值。帶入上式可得：

$$\sum_{j=1}^m C_{dj} A_j [P_j - P_1 - \Delta_1]^{0.5} = 0 \quad (3-61)$$

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：

$$C_{dj} A_j (P_j - P_1 - \Delta)^{0.5} = C_{dj} A_j \left[(P_j - P_1)^{0.5} - \frac{\Delta}{2} (P_j - P_1)^{-0.5} + \frac{\Delta^2}{4} (P_j - P_1)^{-1.5} + \dots \right] \quad (3-62)$$

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

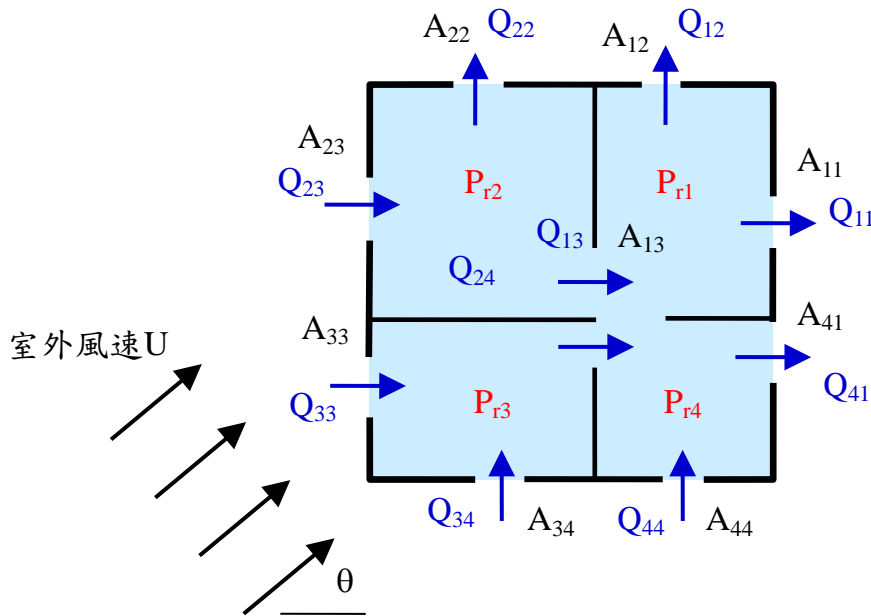


圖 3-15 建築物有室內隔間風壓通風之示意圖

$$\sum_{j=1}^m \left[C_{dj} A_j (P_j - P_i)^{0.5} - \frac{\Delta}{2} C_{dj} A_j (P_j - P_i)^{-0.5} \right] = 0 \quad (3-63)$$

因此壓力修正值：

$$\Delta = \frac{2 \sum_{j=1}^m C_{dj} A_j (P_j - P_i)^{0.5}}{\sum_{j=1}^m C_{dj} A_j (P_j - P_i)^{-0.5}} \quad (3-64)$$

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 Δ ，再計算下一次迭代的室內壓力 P_{r1} ：

$$P_{r1}(k+1) = P_{r1}(k) + \Delta_1(k) \quad (3-65)$$

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 ($\Delta_1/P_{r1} < 0.001$) 為止。為了加速室內壓力收斂的速度，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：

$$P_{ri}(k+1) = P_{ri}(k) + r \cdot \Delta_i(k) \quad (3-66)$$

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。

第五節 通風量計算步驟

當影響建築物自然通風的因素同時存在，譬如外牆開口與盛行風向有一夾角，開口又有裝百葉窗(或紗窗)，有陽台遮蔽外牆上的開口，建築內部縱深長度又超過 10 m，周遭又有其他建築物影響貫流通風，通風量 Q 可以下式計算：

$$Q = K_d K_o K_b K_s K_l Q_o \quad (3-67)$$

式中 Q_o 為風向角為零，外牆開口無裝置，周遭無其他建築物，縱深長度小於 10 m 之貫流通風量； K 為折減係數。

風向效應之折減係數與風向攻角有關，當風向角 $\theta < 80^\circ$ ，風向效應之折減係數可採用餘弦定律(Cosine law)來計算：

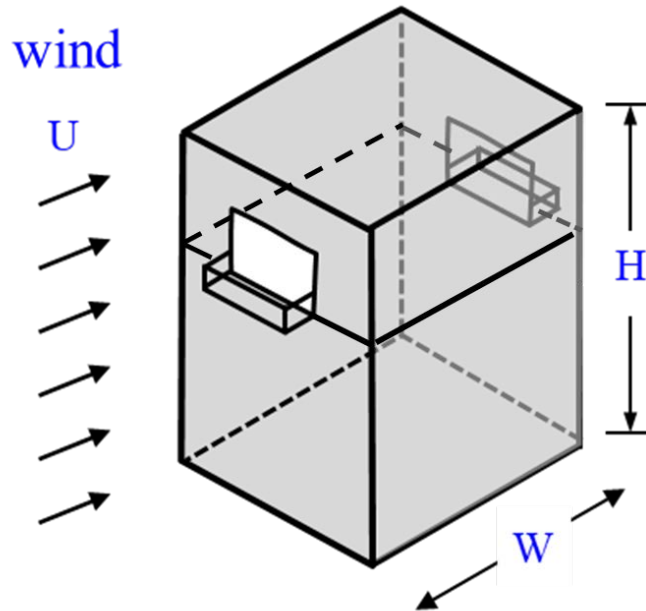
$$K_d = \cos\theta \quad (3-68)$$

當風向角 $\theta > 80^\circ$ ，屬於風切通風，採用(3.17)式計算通風量(Chu et al., 2011)。

建築物外牆開口上裝設百葉窗、紗窗、外推窗(推射窗)等裝置會降低通風量，其折減係數 K_0 如下表所列：

表 3-2 建築物外牆百葉窗、紗窗、外推窗(推射窗) 折減係數 K

開口裝置	流量係數 C_d	折減係數 K_0
紗窗	0.50	0.77
百葉窗	0.60	0.92
外推窗	0.20	0.31



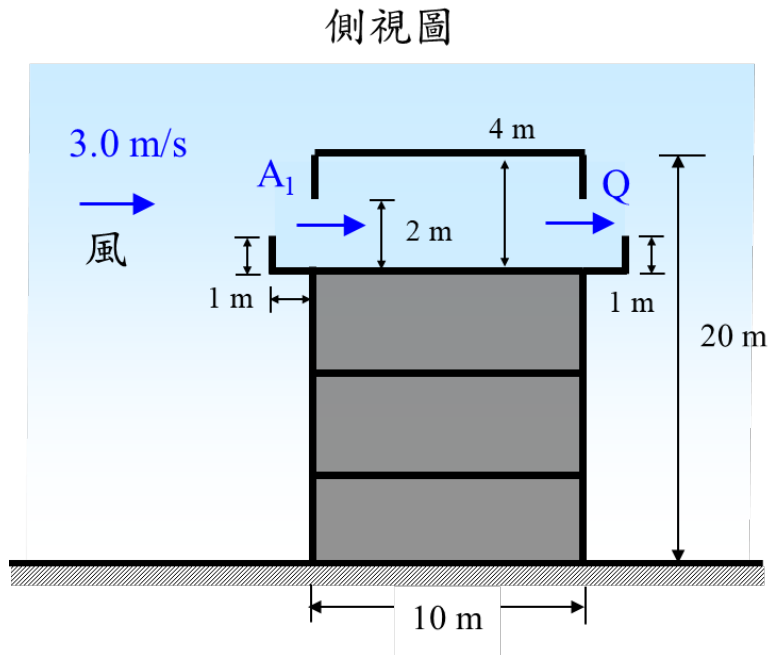


圖 3-16 建築物外推式陽台對落地窗風壓通風影響之示意圖

當建築物內部縱深過長，會消耗氣流的動能，降低貫流通風量(Chu and Chiang, 2014)。建築物縱深之折減係數 K_L 為：

$$K_L = 1.0 \quad \text{當縱深長度 } L < 10 \text{ m}$$

$$K_L = \left(\frac{L}{10}\right)^{-0.115} \quad \text{當縱深長度 } L \geq 10 \text{ m}$$

台灣的住宅式建築物常有外推式陽台，經由落地窗連接到室內。當氣流吹入室內時，不透風式陽台圍牆會阻礙氣流，而造成流入室內的通風量變小。採用 RNG k-epsilon 紊流模式模擬一棟矩形建築物，總高度 $H = 20 \text{ m}$ ，寬度和長度皆為 $L = 10 \text{ m}$ ，最高樓層室內無隔間，內部高度 4 m 。在迎、背風面各有一個落地窗，落地窗斷面積為 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ ，落地窗外有一外推式陽台、陽台寬度 2.0 m ，陽台有不透風之圍牆，高度為 1.0 m 。開口高度處的室外風速 3.0 m/s ，風向正對落地窗。模擬結果發現：陽台圍牆會造成通風量變小，與無陽台建築的貫流通風量比較發現：陽台遮蔽效應之折減係數為 $K_b = 0.67$ 。

相鄰建築物對風壓通風的影響亦可用折減係數來量化，折減係數 K_s 與相鄰建築物的高度、寬度及建築物之間距離有關。紊流模式模擬結果顯示：當兩棟建築物的高度皆為 $H = 20\text{ m}$ ，寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，下風建築物在上風建築物的正後方，兩棟建築物之間距離 $S > 5H$ ，前方建築物對下風建築物的風壓通風的影響可以忽略， $K_s = 1.0$ ；當兩棟建築物之間距離 $S = 20\text{ m} = H$ ，通風量的折減係數 $K_s = 0.67$ 。

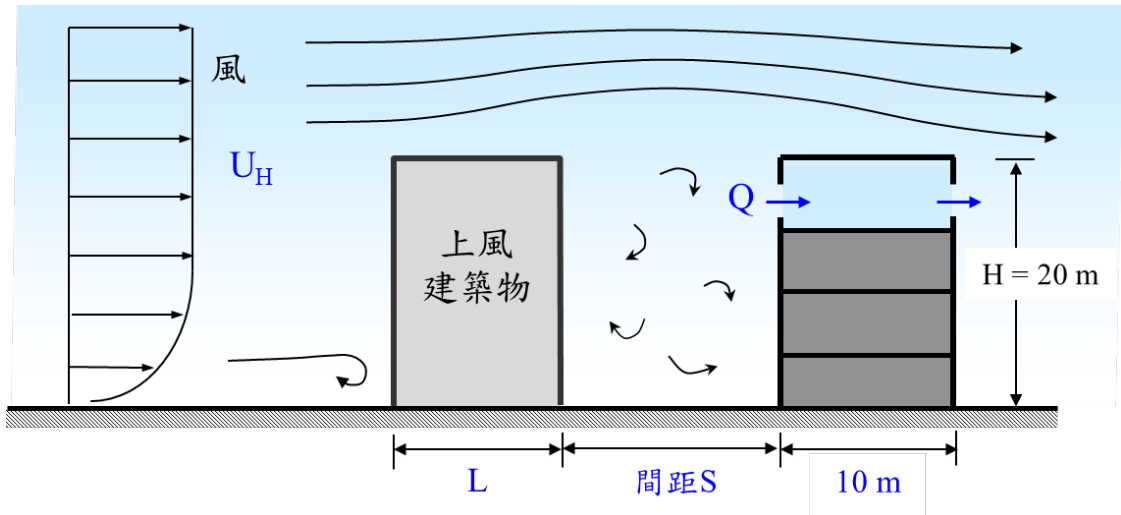


圖 3-17 相鄰建築物影響下風建築物風壓通風之示意圖

當建築物迎風面有數個開口，要計算各個開口的通風量，可採用面積比例法：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{wi}}{\sum C_{di} A_{wi}} \sum Q_{\text{model}} \quad (3-69)$$

下標 i 代表第 i 個開口， w 代表迎風面 (windward)， C_d 為開口的流量係數。亦即迎風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個迎風面開口；同樣地，背風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個背風面開口：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{Li}}{\sum C_{di} A_{Li}} \sum Q_{\text{model}} \quad (3-70)$$

下標 L 代表背風面 (Leeward)。

影響建築物自然通風的最主要因素為室外風速、風向以及建築物對外的開口面積和位置，因此必須考慮建築基地的平均風速和盛行風向來計算自然通風量。但通風

量為進入室內的空氣體積流量，並未考慮室內體積。相同的通風量，對小型的辦公室、會議室是足夠的，但對大型的演講廳、音樂廳可能不夠。因此可採用自然通風狀況下建築物的小時換氣率 ACH 來評估其自然通風之良窳：

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (3-71)$$

式中 V 為室內體積。當一棟建築物的室內氣溫高於室外氣溫時，且換氣率 ACH 愈大，則室內氣溫被室外冷空氣置換而降溫的速度愈快。譬如，建築物的小時換氣率 $ACH = 6 \text{ hr}^{-1}$ ，大約 10 分鐘室內氣溫會變成和室外氣溫相同。

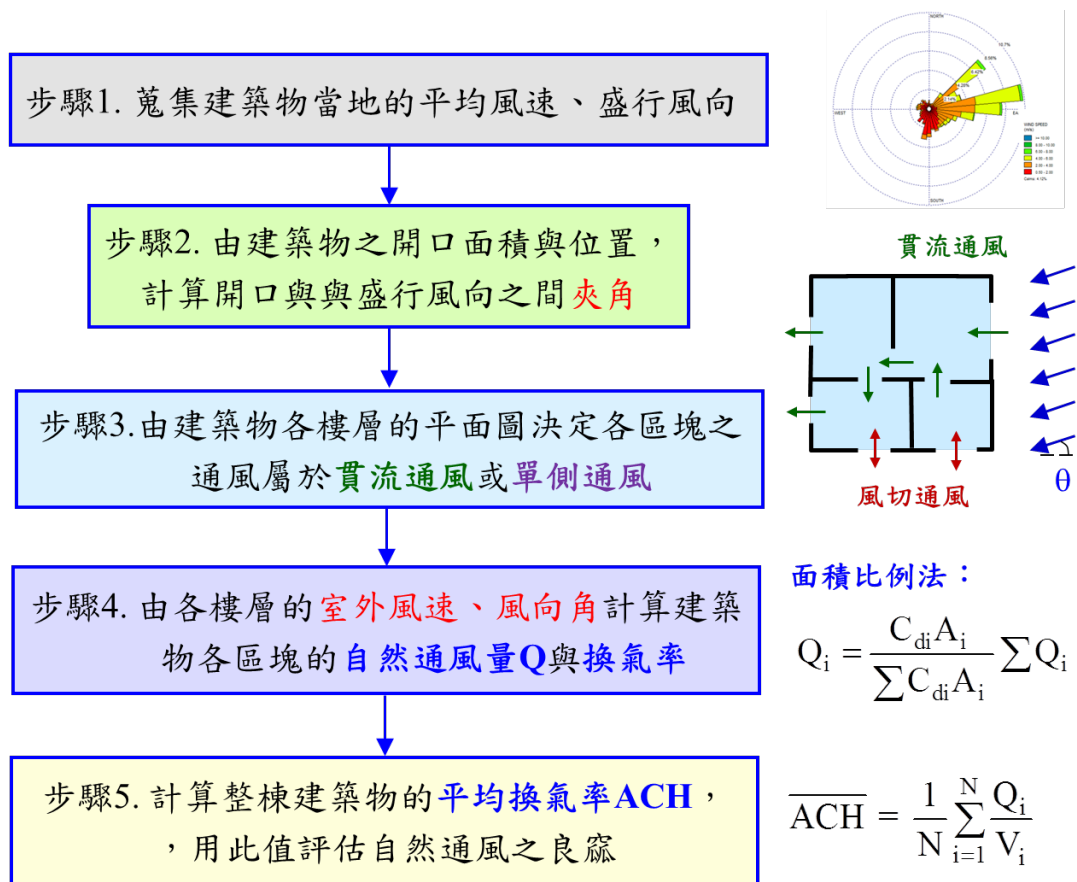


圖 3-18 建築物自然通風計算之流程圖

一棟建築物各區域的通風量、室內體積各異，因此不同樓層、不同房間會有不同的換氣率。本手冊建議採用自然通風狀況下建築物內部各區域的平均換氣率 ACH 來做為整棟建築物自然通風之量化指標：

$$\overline{\text{ACH}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{V_i} \quad (3-72)$$

式中N為建築物內區塊(房間)的總數，Q為各區塊的通風量，V為各區塊之室內體積。

建築物自然通風的評估步驟如下：

步驟 1. 蒐集最靠近基地之氣象站的年平均風速與盛行風向(發生機率最大之風向)。

步驟 2. 決定建築物之座向與盛行風向之間夾角、建築物外牆上和內部開口面積與位置。

步驟 3. 由建築物各樓層的平面圖決定各區塊之通風屬於貫流通風或單側通風。

步驟 4. 由建築物各樓層的室外風速與在外牆上開口面積，計算建築物各區塊的自然通風量 Q 與換氣率 ACH。

步驟 5. 計算整棟建築物的平均換氣率，用此評估自然通風之良窳。

建築物的自然通風的計算式依建築物的形式、開口位置、室內有無隔間而有所不同，以下各章利用建築案例說明不同狀況下建築物的自然通風的計算方式。

第四章 室內無隔間貫流通風示範例

此案例為一棟矩形的建築物，高度 $H = 20 \text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10 \text{ m}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。本示範例僅計算最高居室樓層內外的風場，室內高度 4.0 m ，樓地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ ，室內無隔間。迎風面、背風面各有一個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，建築兩側外牆無開口，如圖4-1所示。迎風面、背風面兩開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (4-39)$$

再利用指數律將氣象站的年平均風速轉換成建築物開口高度處的風速：

$$U(z) = U_{\text{met}} \left(\frac{z}{H_{\text{met}}} \right)^{0.15} = 3.30 \left(\frac{18}{34.9} \right)^{0.15} = 3.0 \text{ m/s} \quad (4-40)$$

此處以台北市氣象站為例，該站的風速計離地面之高度 $H_{\text{met}} = 34.9 \text{ m}$ ，年平均風速 3.30 m/s ，指數 $\alpha = 0.15$ 。轉換成建築物開口高度在高度 18 m 處的室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 。假設風向垂直於開口($\theta = 0^\circ$)，室內外氣溫差異小於 5°C 。由風洞實驗的結果得知：迎風面開口處的風壓係數 $C_{p1} = (P_1 - P_o)/0.5\rho U^2 = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ 。帶入風壓貫流通風之計算模式，通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.84 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 6.26 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4-41)$$

利用此法可計算其他樓層之貫流通風量，表4-1列舉在相同的開口面積 A 、流量

係數之下，1樓、3樓、5樓的通風量結果。可看出：樓層愈高，室外風速愈大，通風量也愈大。當建築物迎風面和背風面開口皆裝上紗窗時，開口的流量係數改變，造成貫流通風量變小，結果整理於表4-1。可看出無裝置之流量係數最大，通風量最大，而外推窗的通風量最小。

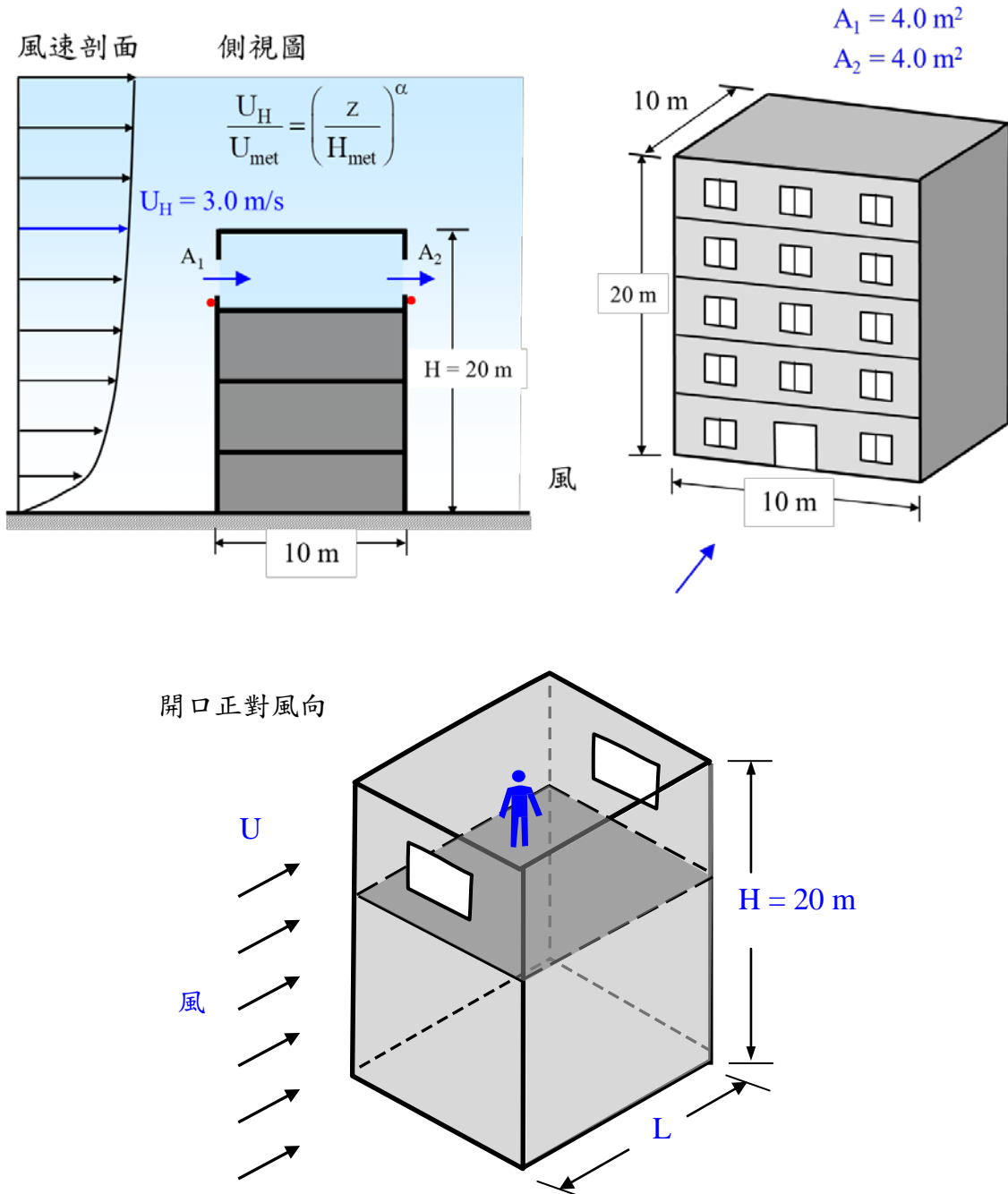


圖 4-21 對側開口貫流通風之示意圖

表4-17不同樓層之貫流通風量

建築物樓層	5 樓	3 樓	1 樓
開口之高度 z	18 m	10 m	2.0 m
開口之風速 $U(z)$	3.0 m/s	2.75 m/s	2.16 m/s
迎風面開口面積 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積 A	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
有效開口面積 A^*	1.84 m ²	1.84 m ²	1.84 m ²
無因次通風量 Q^*	1.14	1.14	1.14
通風量 Q	6.26 m ³ /s	5.74 m ³ /s	4.51 m ³ /s
換氣率 ACH	56.3	51.7	40.6

表4-18 不同開口裝置之貫流通風量

建築物開口	無紗網、無百頁窗	紗窗	百頁窗	外推窗
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積 A_w	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積 A_L	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口流量係數 C_d	0.65	0.50	0.60	0.20
有效開口面積 A^*	1.84 m ²	1.41 m ²	1.70 m ²	0.57 m ²
無因次通風量 Q^*	1.14	1.14	1.14	1.14
通風量 Q	6.26 m ³ /s	4.82 m ³ /s	5.76 m ³ /s	1.92 m ³ /s
換氣率 ACH	56.3	43.4	51.8	17.3
折減係數 K_o	1.0	0.77	0.92	0.31

此處的外推窗是當風向垂直於建築物外牆，而外推窗與牆面之間的夾角又小於90度時，氣流不易流入室內，外推窗通風效果不佳。若風向平行於外推窗或小於外推窗的角度，氣流容易流入室內，外推窗通風效果較佳。

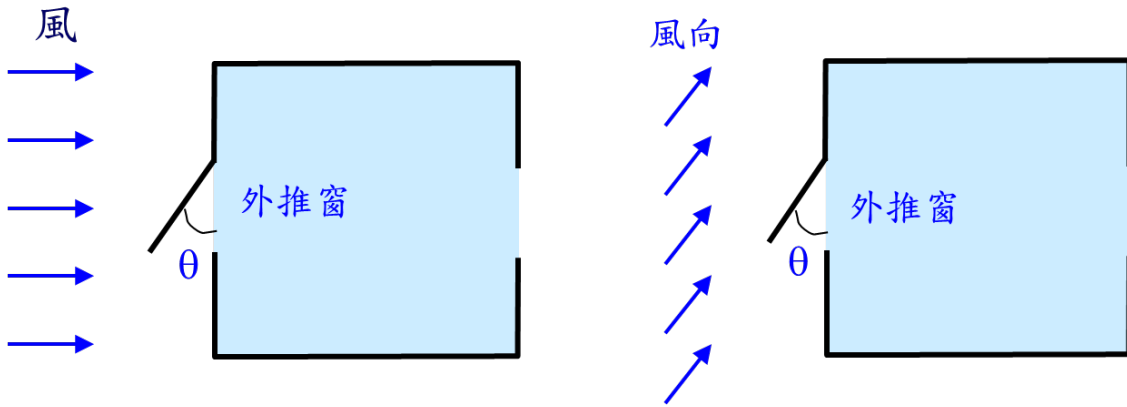


圖 4-22 外推窗與牆面夾角之示意圖

為了瞭解建築物縱深對貫流通風的影響，Chu and Chiang, (2014)用CFD紊流數值模式計算一棟室內無隔間之矩形建築物的貫流通風，建築高度 $H = 4\text{ m}$ ，寬度為 $W = 10\text{ m}$ ，縱深的長度介於 $L = 5 \sim 40\text{ m}$ 。建築物對側外牆各有一個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，如圖4.3所示。開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 1.84\text{ m}^2$ 。風向垂直於開口($\theta = 0^\circ$)，室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。相同的風速、風向及建築物開口面積，僅改變建築物縱深。CFD計算得之迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.20$ 。研究結果顯示：短縱深建築物($L/H < 2.5$)的貫流通風量可用風壓通風模式(3-12)預測，但長縱深建築物內部的阻力會消耗氣流的動能，降低貫流通風量，必須用阻抗模式(Chu and Chiang, 2014)預測通風量。由此研究結果，可以用折減係數計算長建築物貫流通風量。建築物縱深之折減係數 K_L 為：

$$K_L = 1.0 \quad \text{當縱深長度 } L < 10\text{ m}$$

$$K_L = \left(\frac{L}{10}\right)^{-0.115} \quad \text{當縱深長度 } L \geq 10\text{ m}$$

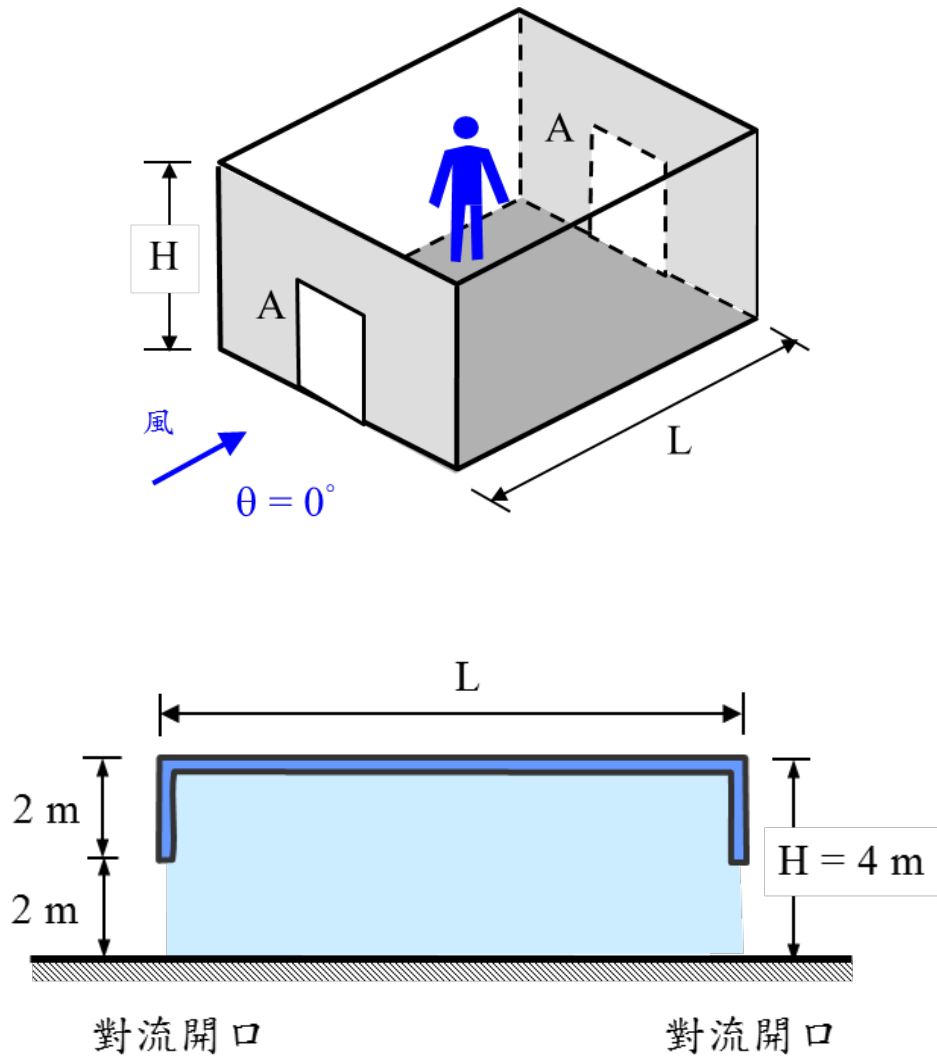


圖 4.-23 建築物縱深對貫流通風之影響

表 4-19 不同長度建築物的貫流通風量

建築物長度	L = 5 m	L = 10 m	L = 20 m	L = 40 m
風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$
地板面積 A_f	50 m ²	100 m ²	200 m ²	400 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
開口面積 A_1	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口面積 A_2	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
折減係數 K_L	-	1.0	0.92	0.85
通風量 Q	6.24 m ³ /s	5.29 m ³ /s	4.89 m ³ /s	4.51 m ³ /s
換氣率 ACH	112	47.6	22.0	10.2

表4-3比較在不同長度建築物的貫流通風量。結果顯示：短縱深(L = 10 m)建築物的通風量最大，長縱深(L = 40 m)通風量約為短縱深(L = 10 m)通風量的85%，但因為建築物內部的體積隨著長度L增加，長縱深(L = 40 m)建築物的小時換氣率ACH遠小於短縱深(L = 10 m)的換氣率。

Step 1. 當建築物長度為L = 20m時，折減係數 K_L ：

$$K_L = \left(\frac{L}{10}\right)^{-0.115} = \left(\frac{20}{10}\right)^{-0.115} = 0.92 \quad (4-42)$$

Step 2. 由開口面積求得有效開口面積 A^* ：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (4-43)$$

Step 3. 帶入通風量公式：

$$Q_1 = K_L \cdot A^* \cdot U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 0.92 \times 1.84 \times 3 \times [0.72 + 0.20]^{1/2} = 4.89 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (4-44)$$

第五章 不同風向之風壓通風示範例

此案例與第四章的建築物完全相同，矩形的建築物，高度 $H = 20\text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。本示範例僅計算最高居室樓層，室內高度 4.0 m ，樓地板面積 $A_f = 100\text{ m}^2$ ，室內無隔間。迎風面、背風面各有一個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，建築兩側外牆無開口。開口無紗網、無百頁窗。
Step 1. 流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，求得有效開口面積 $A^* = 1.84\text{ m}^2$ 。

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84\text{ m}^2 \quad (5-1)$$

Step 2. 先計算風向角 $\theta = 0^\circ$ 的風壓通風量 Q_0 ，室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，迎風面開口的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ 。

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.84 \times 3 \times [0.82 - (-0.47)]^{1/2} = 6.26 \quad (5-2)$$

Step 3. 再計算其他不同風向角($\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)下的自然通風。當風向角 $\theta = 30^\circ$ 和 60° 的風壓通風量可以用餘弦定律(Cosine law)來計算：

$$Q(\theta) = Q_0 \cos \theta = 6.26 \times \cos 30^\circ = 5.40\text{ m}^3 / \text{s} \quad (5-3)$$

當建築物的開口無法完全正對當地的盛行風向，建築物的開口與風向的夾角介於 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 之間，通風量為風向角 $\theta = 0^\circ$ 之貫流通風量的71%。室外風速大時，自然通風量仍有不錯的效果。

Step 4. 當風向平行於開口(風向角 $80^\circ < \theta < 100^\circ$)，風向幾乎平行於開口，屬於風切通風，建築物開口處的風切紊流驅使室內外空氣的交換。表5-1比較在相同的風向、風速、開口面積下，單側、雙側開口的風切通風量，可看出：雙側雙開口的通風量最大，單側單開口的風切通風量最小，大約為貫流通風量的5%，屬於通風不良的狀況。

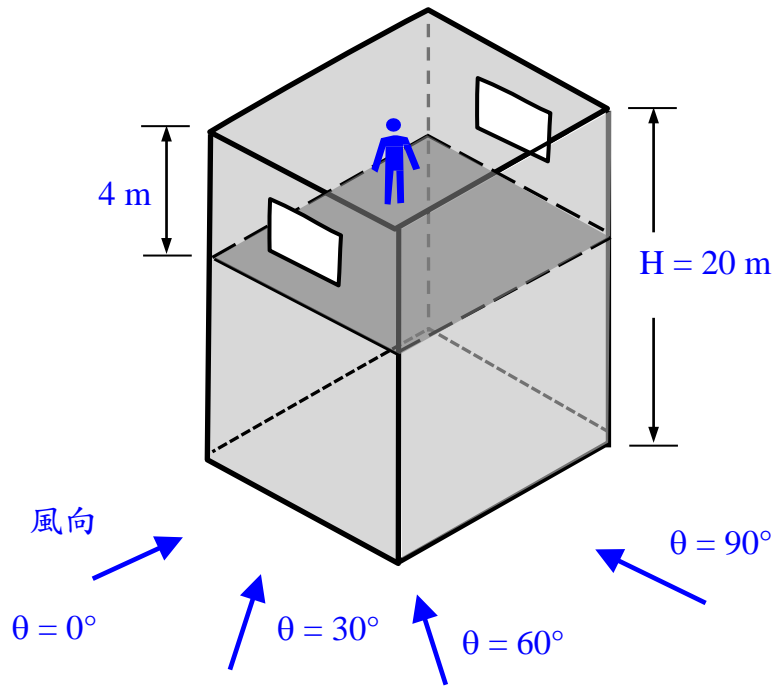


圖 5-1 不同風向下建築物風壓通風之示意圖

表5-1不同風向角之風壓通風量

風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 90^\circ$
地板面積 A_f	100 m^2	100 m^2	100 m^2	100 m^2
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積 A_w	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2
背風面開口面積 A_L	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2
開口流量係數	0.65	0.65	0.65	0.65
有效開口面積 A^*	1.84 m^2	1.84 m^2	1.84 m^2	4.0 m^2
無因次通風量 Q^*	1.14	0.99	0.57	0.077
通風量 Q	$6.26\text{ m}^3/\text{s}$	$5.40\text{ m}^3/\text{s}$	$3.12\text{ m}^3/\text{s}$	$0.91\text{ m}^3/\text{s}$
換氣率 ACH	56.3	48.68	28.1	8.2

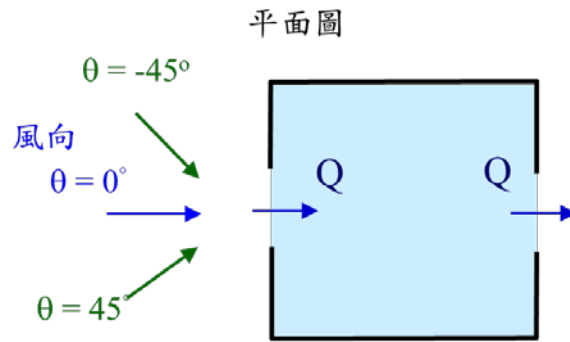


圖 5-2 建築物的開口與風向的夾角之示意圖

若建築物的座向無法完全正對當地的盛行風向，建築物的開口與盛行風向的夾角介於 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 之間，通風量為風向角 $\theta = 0^\circ$ 之貫流通風量的70%，自然通風量仍屬於有效。

當風向平行於開口(風向角 $\theta = 90^\circ$)，如圖5-3所示，建築物開口處的風切紊流驅使室內外空氣的交換，通風量可用式(3.16)、(3.17)預測。表5-2比較在相同的風向、風速、開口面積下，單側、雙側開口的風切通風量，可看出：雙側雙開口的通風量最大，單側單開口的風切通風量最小，大約為貫流通風量的5%，屬於通風不良的狀況。

表5-3為室內無隔間，不同風向下單側雙開口之通風量。當風向角 $\theta = 45^\circ$ ，通風量最大，這是因為兩個開口皆在迎風面，且風壓不對稱之壓差驅動氣流在兩開口間流動；當風向角 $\theta = 180^\circ$ ，通風量最小。這是因為兩個開口皆在背風面，又因為對稱的緣故，風壓差異接近零，只有室外的紊流促使室內外的空氣交換。

表 5-2 風向平行於建築物開口之風壓通風量

開口形式	單側單開口		單側雙開口	雙側雙開口
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$
風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 90^\circ$
地板面積 A_f	100 m ²	100 m ²	100 m ²	100 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
開口面積 A_1	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
開口面積 A_2	0 m ²	0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
無因次通風量 Q^*	0.025	0.0175	0.089	0.077
通風量 Q	0.295 m ³ /s	0.207 m ³ /s	1.07 m ³ /s	0.908 m ³ /s
換氣率 ACH	2.7	1.9	9.6	8.2

Step 1. 流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，求得有效開口面積 $A^* = 1.84 \text{ m}^2$ 。

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (5-4)$$

Step 2. 當風向角 $\theta = 0^\circ$ ，室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，可用下式計算通風量 Q

$$Q = C \cdot U \cdot A = 0.025 \times 3.0 \times 4 = 0.295 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5-5)$$

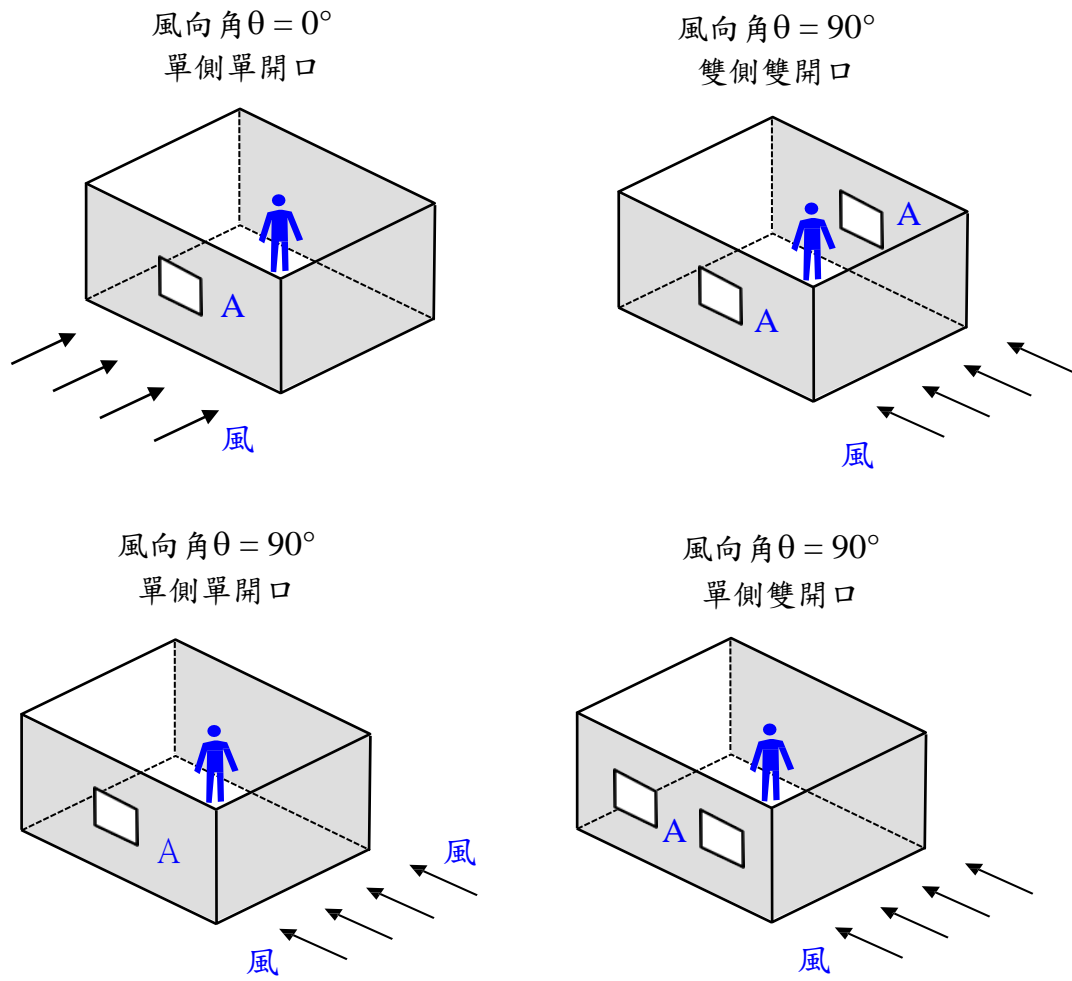


圖 5-3. 風向平行於建築物開口之風壓通風

表 5-3 不同風向下單側雙開口室內無隔間之風壓通風量

風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 180^\circ$
地板面積 A_f	100 m ²	100 m ²	100 m ²	100 m ²
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
背風面開口面積	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²	4.0 m ²
無因次通風量 Q^*	0.075	0.179	0.089	0.052
通風量 Q (m ³ /s)	0.885	2.11	1.05	0.61
換氣率 ACH	7.97	19.0	9.45	5.52

Step 1. 流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，求得有效開口面積 $A^* = 1.84 \text{ m}^2$ 。

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (5-6)$$

Step 2. 當風向角 $\theta = 0^\circ$ ，可用下式計算通風量 Q ，室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$

$$Q = C \cdot U \cdot A = 0.075 \times 3.0 \times 4 = 0.885 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5-7)$$

第六章 室內有隔間之風切通風示範例

本章的案例和第四章的矩形建築物的尺寸、開口面積、室外風速完全相同，但最高樓層室內分隔成兩個房間之建築物。建築物總高度 $H = 20\text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，本案例僅計算最高居室樓層，室內高度 $h = 4.0\text{ m}$ ，在同一側外牆上有兩個開口，開口面積相同 $A_1 = A_2 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，開口無紗網、無百頁窗狀況下，室內有一牆將內部空間隔成相同大小的兩個房間，房間地板面積分別為 50 m^2 。周遭無其他影響風場之建築物，室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，當風向平行於開口 ($\theta = 90^\circ$)，如圖 6.1 所示，建築物開口處的風剪力驅使室內外空氣的交換，通風量可用圖 3.8 之實驗結果預測。表 6-1 比較在相同的風向、風速、開口面積，室內有隔間，不同風向下單側雙開口之通風量。當風向角 $\theta = 45^\circ$ ，單側雙開口的通風量最大，但仍小於室內無隔間之通風量。

表 6-1 不同風向單側雙開口室內有隔間之風壓通風量

風向角	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 180^\circ$
地板面積 A_f	100 m^2	100 m^2	100 m^2	100 m^2
居室層高度 h	4.0 m	4.0 m	4.0 m	4.0 m
迎風面開口面積	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2
背風面開口面積	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2	4.0 m^2
無因次通風量 Q^*	0.041	0.092	0.051	0.055
通風量 Q (m^3/s)	0.484	1.086	0.60	0.65
換氣率 ACH	4.36	9.77	5.42	5.84

Step 1. 流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，求得有效開口面積 $A^* = 1.84\text{ m}^2$ 。

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84\text{ m}^2 \quad (6-1)$$

Step 2. 當風向角 $\theta = 0^\circ$ ，可用下式計算通風量 Q ，室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 。

$$Q = C \cdot U \cdot A = 0.041 \times 3.0 \times 4 = 0.484 \text{ m}^3/\text{s} \quad (6-2)$$

表6-1之通風量結果顯示：當風向角 $\theta = 0^\circ$ 和 180° ，通風量皆很小。這是因為兩個開口對稱的緣故，風壓差異接近零，只有室外的紊流促使室內外的空氣交換。而風向角 $\theta = 45^\circ$ ，通風量最大，因為兩個開口皆在迎風面，因為風斜斜吹來的不對稱，導致風壓差異大。本示範例和前一章案例比較可知：在相同室外風速、風向下，無室內隔間之建築物的自然通風量大於有隔間之通風量。

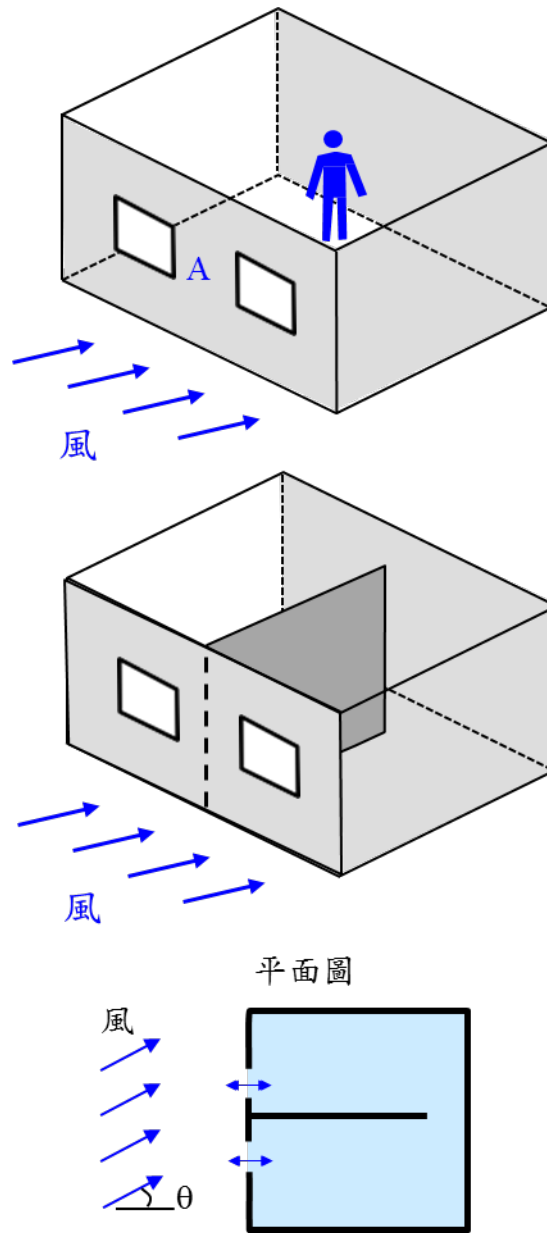


圖 6-1 單側雙開口建築物之風壓通風

第七章 三側三開口之風壓通風示範例

本示範例探討室內隔間對通風路徑之影響，建築物高度 $H = 20\text{ m}$ ，長度與寬度皆為 $L = 10\text{ m}$ ，周遭無其他影響風場之建築物。本案例僅計算最高居室樓層，室內高度 4.0 m ，建築物的地板面積 100 m^2 。該樓層在迎風面、背風面及側面外牆上各有一個開口，開口面積 $A_1 = A_2 = A_3 = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，開口位置和室內隔間共有五種不同的狀況，如圖7-1所示，開口無紗網、無百頁窗，流量係數皆為 $C_d = 0.65$ 。當室外風速 $U = 3.0\text{ m/s}$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ ，將風壓係數帶入可求得無因次通風量 Q^* ：

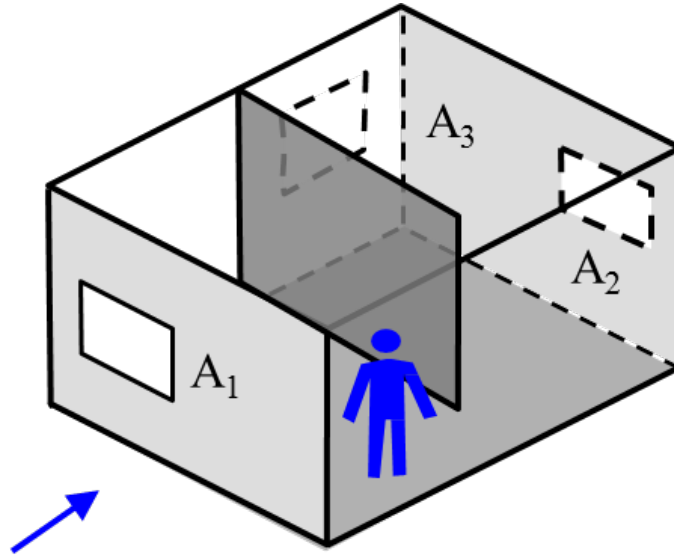
$$Q^* = \frac{Q}{A^* U} = \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = [0.82 + 0.47]^{1/2} = 1.136 \quad (7-1)$$

三個開口的有效開口面積 $A^* = 2.326\text{ m}^2$ ，將室外風速帶入得通風量 $Q_{\text{model}} = 7.92\text{ m}^3/\text{s}$ ；兩個開口的有效開口面積 $A^* = 1.838\text{ m}^2$ ，預測得之通風量 $Q_{\text{model}} = 6.26\text{ m}^3/\text{s}$ 。

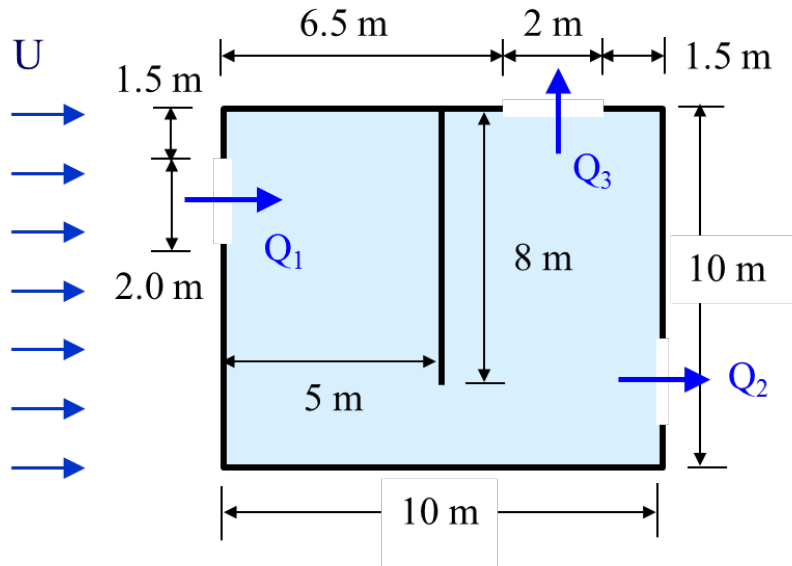
$$Q = U \times Q^* \times A^* = 1.136 \times 2.326 \times 3.0 = 7.92\text{ m}^3/\text{s} \quad (7-2)$$

$$Q = U \times Q^* \times A^* = 1.136 \times 1.838 \times 3.0 = 6.26\text{ m}^3/\text{s} \quad (7-3)$$

此外，本案例利用 $k-\varepsilon$ RNG數值模式驗證這五個案例的風壓通風量，計算域的長度為 190 m ，高度為 100 m (5倍建築物高度)，寬度為 80 m ，計算網格採不均勻網格，室內最小網格皆為 0.2 m 。預測得之貫流通風量 Q_{model} 列於表7-1，可看出CFD模擬得之通風量 Q_{CFD} 與式(3-12)預測之通風量 Q_{model} 結的誤差皆在6%之內，顯示風壓通風模式的正確性。此外，案例6-1的總通風量最大，這是因為其有效開口面積 A^* 最大，且室內無隔間之緣故；案例6-4的通風量最小，因為側牆上開口的風壓力較小，且室內有隔間，其通風量約為案例6-1通風量的78%。



平面圖



$$A_1 = A_2 = A_3 = 4.0 \text{ m}^2$$

圖 7-1 三側三開口建築物室內隔間及開口位置之示意圖

表 7- 1CFD 模式計算得之案例 6 的風壓通風量

案例	Case 6-1	Case 6-2	Case 6-3	Case 6-4	Case 6-5
C_{p1}	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
C_{p2}	-0.47	-0.47	-0.47	-0.47	-0.47
C_{p3}	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50
Q^*	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
$A^* (m^2)$	2.326	2.326	2.326	1.838	1.838
$Q_{model} (m^3/s)$	7.92	7.92	7.92	6.26	6.26
$Q_{CFD} (m^3/s)$	7.78	7.45	7.74	6.07	6.36
Error	1.8%	5.9%	2.2%	3.0%	1.6%

Step 1. 流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，求得有效開口面積 $A^* = 1.84 m^2$ 。

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = \frac{0.65 \times 0.65 \times 4 \times 4}{(0.65^2 \times 4^2 + 0.65^2 \times 4^2)^{1/2}} = 1.84 m^2 \quad (7-4)$$

Step 2. 當室外風速 $U = 3.0 m/s$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ ，將風壓係數帶入可求得無因次通風量 Q^*

$$Q^* = \frac{Q}{A^* U} = \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = [0.82 + 0.47]^{1/2} = 1.136 \quad (7-5)$$

Step 3. 三個開口的有效開口面積 $A^* = 2.326 m^2$ ，將室外風速帶入得通風量 $Q_{model} = 7.92 m^3/s$ ；兩個開口的有效開口面積 $A^* = 1.838 m^2$ ，預測得之通風量 $Q_{model} = 6.26 m^3/s$ 。

$$Q = U \times Q^* \times A^* = 1.136 \times 2.326 \times 3.0 = 7.92$$

$$Q = U \times Q^* \times A^* = 1.136 \times 1.838 \times 3.0 = 6.26 \quad (7-6)$$

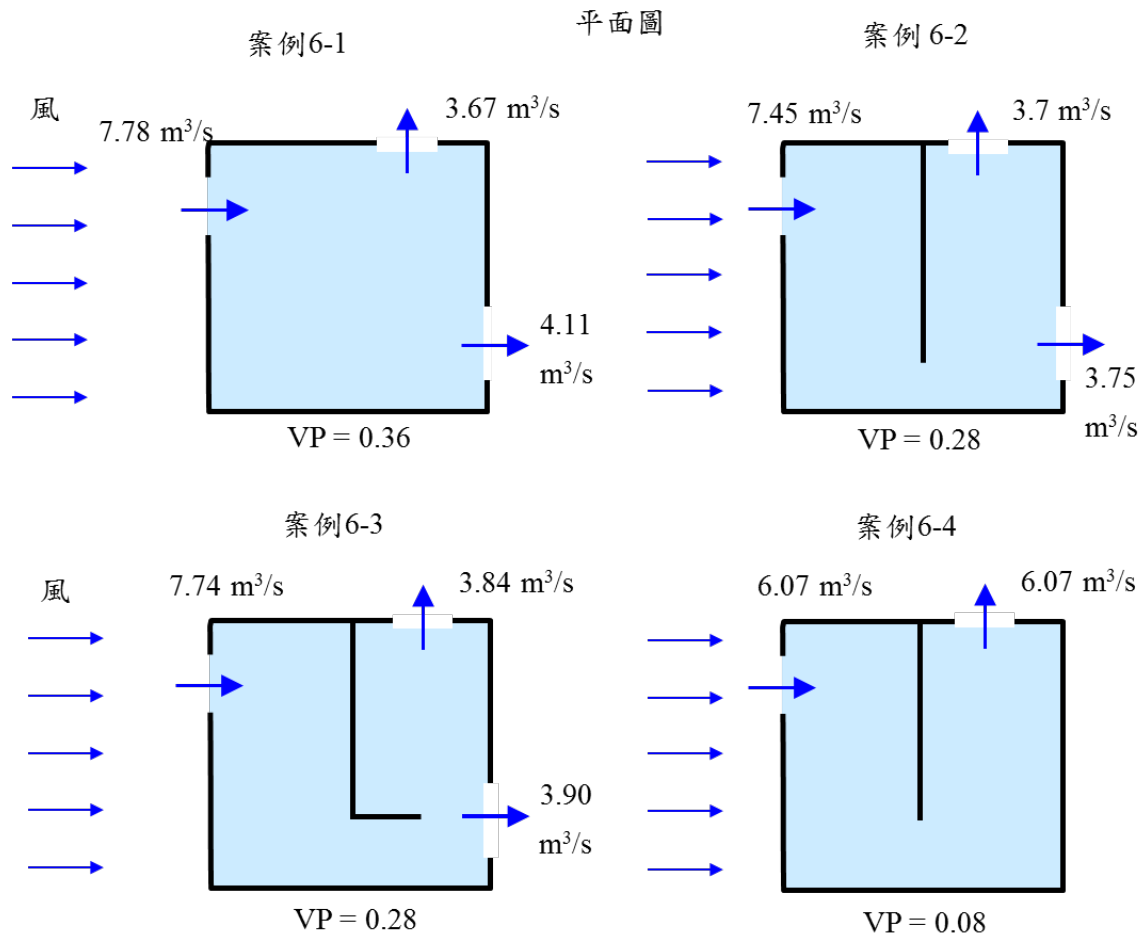


圖 7-2 三側三開口建築物之風壓通風量

第八章 廠房之貫流通風示範例

本章案例為一棟室內無隔間之單斜式屋頂三連棟廠房，周遭無其他影響風場之建築物，長度為 21.6 m，寬度為 20 m，屋頂最高點高度 4.8 m，最低點高度 3.0 m，建築物的地板面積 $A_f = 432 \text{ m}^2$ 。建築物迎風面、背風面各有兩個開口，低處開口面積 $A_w = A_L = 12 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ ，高處屋頂開口面積 $A_{r1} = A_{r2} = 12 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。在風向角 $\theta = 0^\circ$ ，迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.26$ 。當風向角 $\theta = 180^\circ$ ，迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.34$ 。

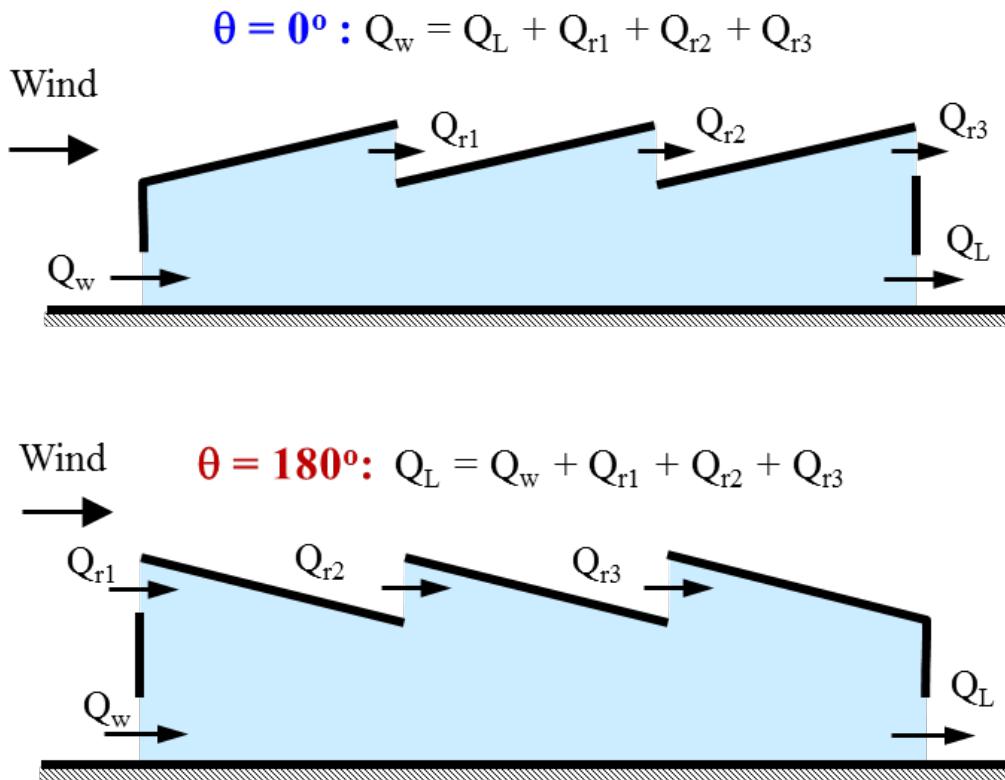


圖 8-1 單區間多開口廠房風壓通風之示意圖

表 8-1 廠房之風壓通風量

風向角	風向 $\theta = 0^\circ$		風向 $\theta = 180^\circ$	
地板面積 A_f	432 m ²		432 m ²	
平均高度 h	3.9 m		3.9 m	
室內體積 V	1685 m ³		1685 m ³	
迎風面開口面積 A_w	19.2 m ²		19.2 m ²	
背風面開口面積 A_L	19.2 m ²		19.2 m ²	
無因次通風量 Q^*	1.05		1.05	
屋頂開口	關閉	開啟	關閉	開啟
屋頂開口面積 A_r	0 m ²	9.60 m ²	0 m ²	9.60 m ²
有效開口面積 A^*	8.83 m ²	11.59 m ²	8.83 m ²	11.59 m ²
通風量 Q (m ³ /s)	20.7 m ³ /s	27.3 m ³ /s	21.6 m ³ /s	28.3 m ³ /s
折減係數	0.915	0.915	0.915	0.915
通風量 Q (m ³ /s)	19.0 m ³ /s	24.9 m ³ /s	19.8 m ³ /s	25.9 m ³ /s
換氣率 ACH	40.6 hr ⁻¹	53.3 hr ⁻¹	42.2 hr ⁻¹	55.4 hr ⁻¹

Step 1. 開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。屋頂開口關閉狀

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 8.83 \text{ m}^2$$

況下，有效開口面積：

(8-1)

Step 2. 再利用指數律將氣象站平均風速轉換成建築物屋頂平均高度處的風速：

$$U(z) = U_{\text{met}} \left(\frac{z}{H_{\text{met}}} \right)^{0.15} = 3.30 \left(\frac{3.9}{34.9} \right)^{0.15} = 2.38 \text{ m/s} \quad (8-2)$$

此處以台北市氣象站的風速計高度 $H_{\text{met}} = 34.9 \text{ m}$ ，年平均風速 3.30 m/s ，指數 $\alpha = 0.15$ 。

轉換成建築物屋頂平均高度 18 m 處的室外風速 $U = 2.38 \text{ m/s}$ 。

Step 3. 風向垂直於開口($\theta = 0^\circ$)，將風壓係數和有效開口面積帶入風壓通風模式，可得貫流通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 11.59 \cdot 2.38 \cdot [0.72 + 0.26]^{1/2} = 20.7 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (8-3)$$

Step 4. 屋頂開口開啟狀況下，有效開口面積 $A^* = 11.59 \text{ m}^2$ 。

Step 5. 建築物的長度 $L = 21.6 \text{ m} > 10 \text{ m}$ ，縱深折減係數 K_L ：

$$K_L = \left(\frac{21.6}{10} \right)^{-0.115} = 0.915 \quad (8-4)$$

Step 6. 前方無其他建築物，故遮蔽效應的折減係數 $K_s = 1.0$ 。

Step 7. 無陽台圍牆，折減係數 $K_b = 1.0$ 。

Step 8. 故貫流通風量計算如下：

$$Q = K_d K_o K_b K_L K_s Q_o = 0.915 \cdot 20.7 = 19.0 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (8-5)$$

Step 9. 當風向角 $\theta = 180^\circ$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{pw} = 0.72$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.34$ ，無因次通風量 Q^* ：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 8.83 \cdot 2.38 \cdot [0.72 + 0.34]^{1/2} = 28.3 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (8-6)$$

表4-9比較在風向 0° 和 180° 下，預測得之通風量 Q ，可以發現：屋頂開口在開啟的狀況下可增加通風量約30%；而風向角 $\theta = 180^\circ$ 的通風量大於風向角 $\theta = 0^\circ$ 的通風量。

第九章 住宅之風壓通風示範例

此案例為一棟住宅建築物，長度為 10 m，寬度為 10 m，室內高度 4 m，建築物的地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ 。建築物面對風向有三個開口，開口面積 $A_{w1} = 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ， $A_{w2} = A_{w3} = 1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，背風面有兩個開口，開口面積 $A_{L1} = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ， $A_{L2} = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。周遭無其他影響風場之建築物。不考慮陽台圍牆對風場的影響，且窗戶為橫拉窗，無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 2.76 \text{ m}^2$ 。在屋頂高度處的風速 $U_H = 3.0 \text{ m/s}$ ，本章共有四個示範例，計算各種狀況下的通風量。

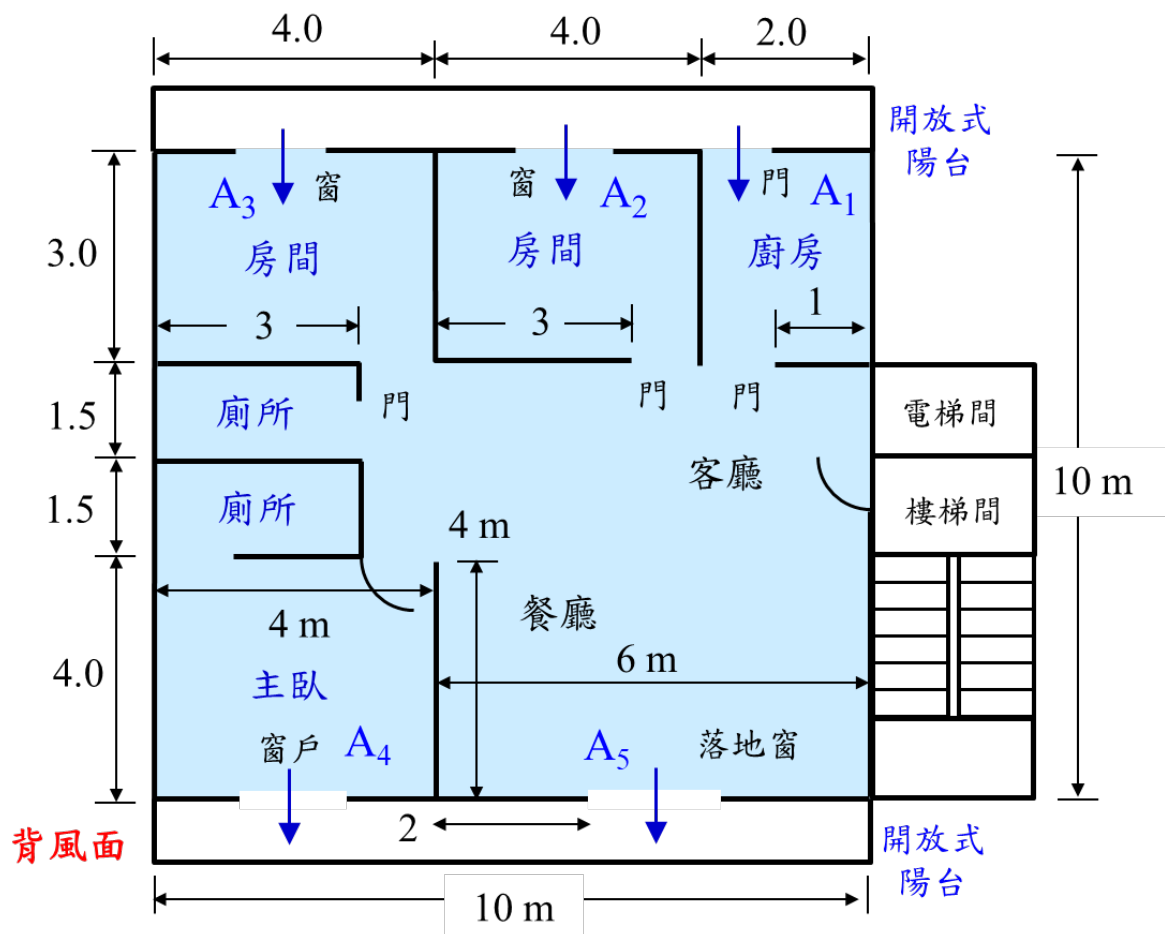


圖 9-1 住宅室內隔間之示意圖

(1) 案例 9-1：此案例為風向由北往南吹，室內外門窗皆開啟，屬於貫流通風，不考慮前後陽台對氣流的影響。

Step 1.開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。屋頂開口關閉狀

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 8.83 \text{ m}^2$$

況下，有效開口面積：

$$(9-1)$$

Step 2.開口面積帶入風壓通風模式計算整戶的總通風量：

$$\sum Q = A^* U \left[C_{pw} - C_{pL} \right]^{1/2} = 2.76 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 9.40 \text{ m}^3/\text{s} \quad (9-2)$$

用模式計算得之總通風量 $\sum Q_{\text{model}} = 9.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ，十分接近用 RNG k-epsilon CFD 數值模式計算得之通風量 $\sum Q_{\text{CFD}} = 9.09 \text{ m}^3/\text{s}$ ，誤差 3.3%，顯示風壓通風模式的正確性頗佳。

利用面積比例法計算各個開口的通風量：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{wi}}{\sum C_{di} A_{wi}} \sum Q_{\text{model}} \quad (9-3)$$

下標*i*代表第*i*個開口，*w*代表迎風面(windward)， C_d 為開口的流量係數。亦即迎風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個迎風面開口；同樣地，背風面上的總通風量按照開口面積比例分配給各個背風面開口：

$$Q_i = \frac{C_{di} A_{Li}}{\sum C_{di} A_{Li}} \sum Q_{\text{model}} \quad (9-4)$$

下標*L*代表背風面(Leeward)。因為此案例的迎風面上有三個開口，背風面上有兩個開口，表9-1比較各個開口的通風量，皆十分接近用RNG k-epsilon數值模式計算得之通風量*Q*，證明可以用面積比例法計算各個開口的通風量。

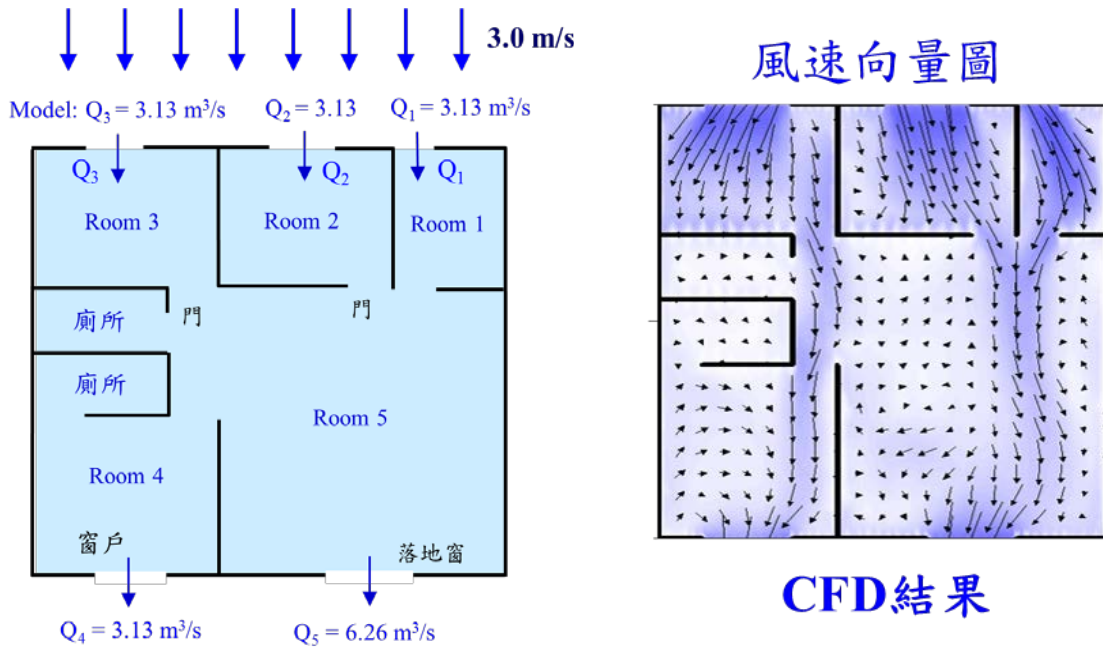


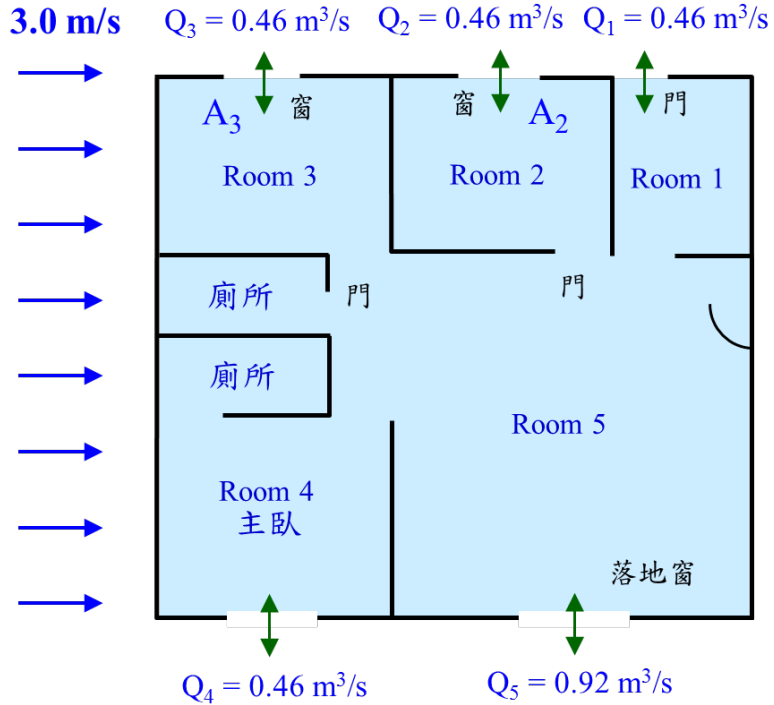
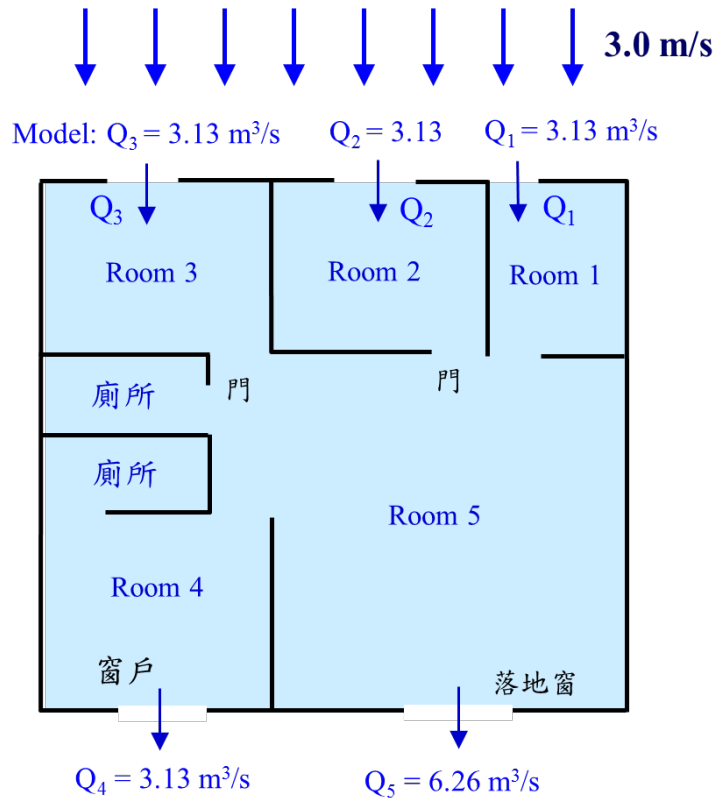
圖 9-2 住宅案例 9-1 之風壓通風量和風速向量圖

(2) 案例 9-2：此例為風向由西往東吹，風向平行於建築物開口，當室內門皆敞開，屬於雙側雙開口的風切通風。計算各個開口處的通風量，譬如廚房到陽台之間的門的通風量：

$$Q = 0.077U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 2 = 0.46 \text{ m}^3 / \text{s}$$

譬如客廳到陽台之間的落地窗的通風量：

$$Q = 0.077U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 4 = 0.92 \text{ m}^3 / \text{s}$$



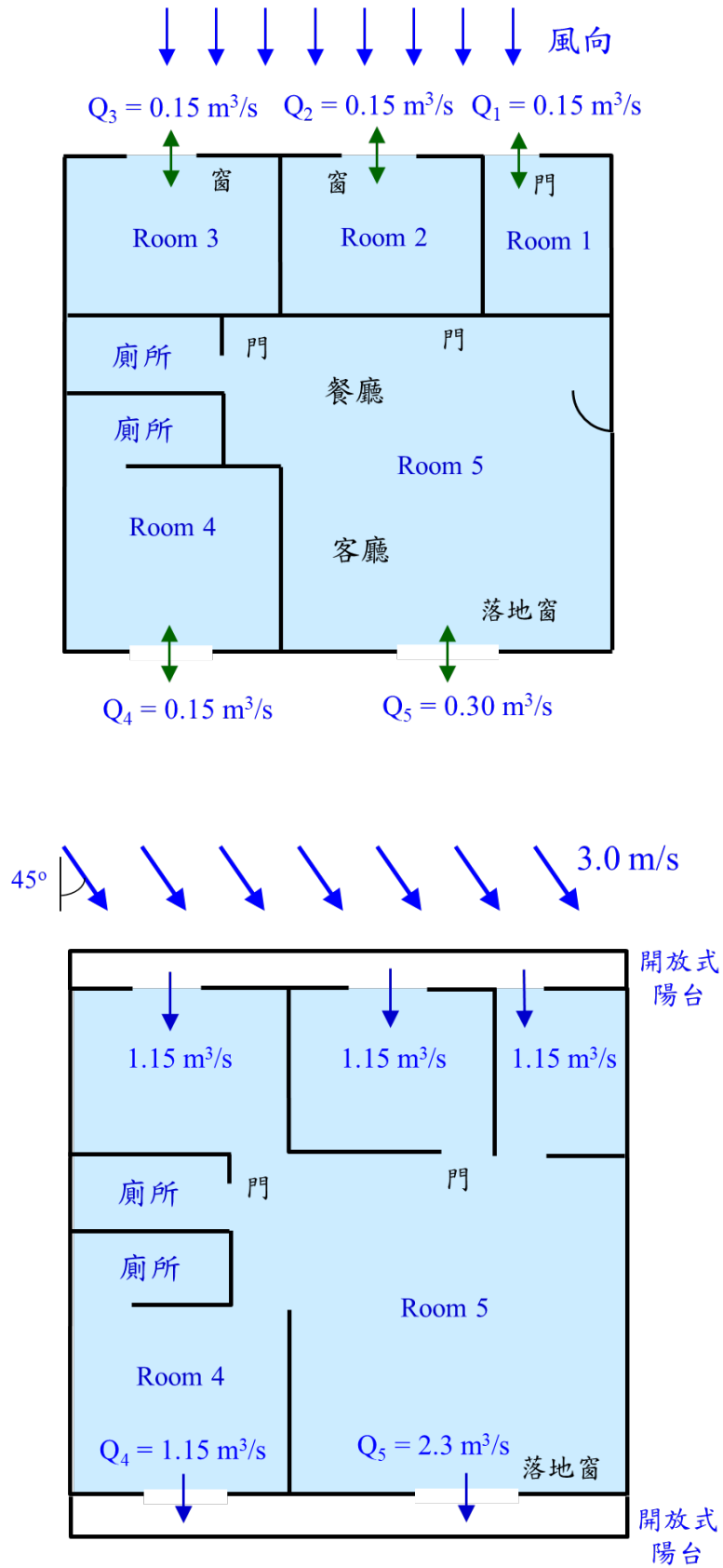


圖 9-3. 住宅示範例之通風(a)案例 9-1；

表 9-1 案例 9-1 各房間的通風量(貫流通風)

房間	Q_{model} (m ³ /s)	Q_{CFD} (m ³ /s)	誤差
迎風面 Room 1	3.13	3.48	11.2%
迎風面 Room 2	3.13	2.88	8.0%
迎風面 Room 3	3.13	2.72	13.1%
背風面 Room 4	3.13	2.79	10.9%
背風面 Room 5	6.26	6.30	0.6%
總通風量	9.40	9.09	3.3%

表 9-2 案例 9-2 各房間的通風量(風切通風)

房間	室內體積 V (m ³)	Q (m ³ /s)	ACH
迎風面 Room 1	24	0.46	69.3
迎風面 Room 2	48	0.46	24.8
迎風面 Room 3	48	0.46	24.8
背風面 Room 4	82	0.46	20.2
背風面 Room 5	180	0.92	18.4
總通風量	400	-	31.5

Step 1.開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ 。屋頂開口關閉狀

況下，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 8.83 \text{ m}^2$$

(9- 5)

Step 2.開口面積帶入風壓通風模式計算整戶的總通風量：

$$\sum Q = A^* U \left[C_{pw} - C_{pL} \right]^{1/2} = 2.76 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 9.40 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (9- 6)$$

表 9-3 案例 9-3 各房間的通風量(單側通風)

房間	室內體積 V (m ³)	Q (m ³ /s)	ACH
迎風面 Room 1	24	0.15	22.5
迎風面 Room 2	48	0.15	11.3
迎風面 Room 3	48	0.15	11.3
背風面 Room 4	82	0.15	6.6
背風面 Room 5	180	0.30	6.0
總通風量	400	-	11.5

表 9-4. 案例 9-4 各房間的通風量(折減效應)

房間	室內體積 V (m ³)	Q _{model} (m ³ /s)	ACH
迎風面 Room 1	24	1.15	172.5
迎風面 Room 2	48	1.15	86.3
迎風面 Room 3	48	1.15	86.3
背風面 Room 4	82	1.15	50.5
背風面 Room 5	180	2.30	46.0
總通風量	400	3.45	88.3

(3) 案例 9-3：風向由北往南吹，風向垂直於建築物開口，但室內門皆關閉，屬於單側單開口的風壓通風。譬如廚房到陽台之間的通風量：

$$Q = 0.025U \cdot A = 0.025 \cdot 3 \cdot 2 = 0.15 \text{ m}^3 / \text{s}$$

譬如客廳的落地窗的通風量：

$$Q = 0.025U \cdot A = 0.025 \cdot 3 \cdot 4 = 0.30 \text{ m}^3 / \text{s}$$

由表 9-3 的結果可看出各房間的通風量皆小於室內門開啟時的貫流通風量。

(4) 案例 9-4：風向角 $\theta = 45^\circ$ ，室內外門窗皆開啟，皆裝有紗窗，前後開放式陽台皆有不透風圍牆，圍牆高度 1.0 m，上風處有另一棟相同建築物，兩棟建築物之間距離 $S = H = 20 \text{ m}$ 。利用風壓通風模式計算整戶的總通風量 $Q = 9.40 \text{ m}^3 / \text{s}$ 。風向角 $\theta = 45^\circ$ ，可得風向折減係數 $K_d = 0.71$ ；陽台圍牆的折減係數 $K_b = 0.67$ ；紗窗的折減係數 $K_o = 0.77$ ；建築物的長度等於 10 m，縱深折減係數 $K_L = 1.0$ ；當開口高度在 $z/H = 0.75$ ，係數 $A = 1.0$ ，故遮蔽效應的折減係數 K_s ：

$$K_s = A - \exp\left(-0.64 \frac{S}{H}\right) = 1 - \exp(-0.64) = 0.47$$

故貫流通風量計算如下：

$$Q = K_d K_o K_b K_s Q_0 = 0.71 \times 0.77 \times 0.67 \times 0.47 \times 9.40 = 1.62 \text{ m}^3 / \text{s}$$

再用面積比例法計算各個對外開口的通風量，可以看出各個開口的通風量 Q 皆小於案例 1 的貫流通風量，但仍大於案例 2 (風切通風) 與案例 3 (單側通風) 之通風量，亦即建築物開口應盡量面對當地的盛行風向，既使有各種因素的影響，貫流通風可以在幾分鐘內，降低室內氣溫。此外，若使用「綠建築評估手冊-基本型」(2019) 計算這四個案例的自然通風潛力 $VP = 0.12$ 皆相同，但通風量 Q 卻有很大差異，顯示自然通風潛力 VP 無法反映建築物真實的自然通風狀況。

第十章 浮力通風示範案例

當一棟建築物內部高處和地面有溫度差異，且在外牆高處和低處皆有開口，則室內的熱空氣會由高處的開口流出，而室外的冷空氣會由低處開口流入補充，利用空氣的熱浮力地將熱空氣排出，並促使室內外的空氣上下對流。本示範例為一棟透天式建築物熱浮力通風，如圖10.1，周遭無其他影響風場之建築物，建築物高度為20 m，寬度和長度皆為10 m，建築物的地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ 。建築物迎風面和屋頂各有一個開口，迎風面開口面積 $A_w = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，屋頂開口面積 $A_L = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ，兩個開口的高度差異 $z_2 - z_1 = 18 \text{ m}$ 時。

Step 1: 開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.84 \text{ m}^2 \quad (10-1)$$

Step 2: 室外氣溫 $22^\circ\text{C} = 295^\circ\text{K}$ ，室內氣溫 30°C 。當室外風速 $U = 0$ ，通風由熱浮力所主導，因室內外溫差所造成的通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} \right]^{1/2} = 5.70 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-2)$$

Step 3: 當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，風向角 $\theta = 0^\circ$ ，且低處的開口在迎風面，室內外溫差 $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ ，迎風面開口處的风壓係數 $C_{pw} = 0.78$ ，背風面的風壓係數 $C_{pr} = -0.40$ 。迎風面開口處的风壓 $P_w = 4.2 \text{ Pa}$ ，屋頂的风壓 $P_r = -2.16 \text{ Pa}$ 。通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2|P_w - P_r|}{\rho} + \frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} \quad (10-3)$$

$$Q = 1.84 \left[\frac{2(4.2 + 2.16)}{1.20} + \frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} \right]^{1/2} = 8.25 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-4)$$

Step 4: 當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 的狀況，低處的開口在背風面，開口處的风壓係數 $C_{pL} = -0.47$ ，風壓 $P_L = -2.54 \text{ Pa}$ 。屋頂的风壓係數 $C_{pr} = -0.32$ ，風壓 $P_r = -1.73 \text{ Pa}$ 。通風量：

$$Q = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} - \frac{2|-2.54 + 1.73|}{1.20} \right]^{1/2} = 5.27 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-5)$$

因為迎風面開口位於高處，背風面開口位於低處時，室外風速與流出的熱空氣方向相反，風壓與浮力互相抵銷其通風效果。

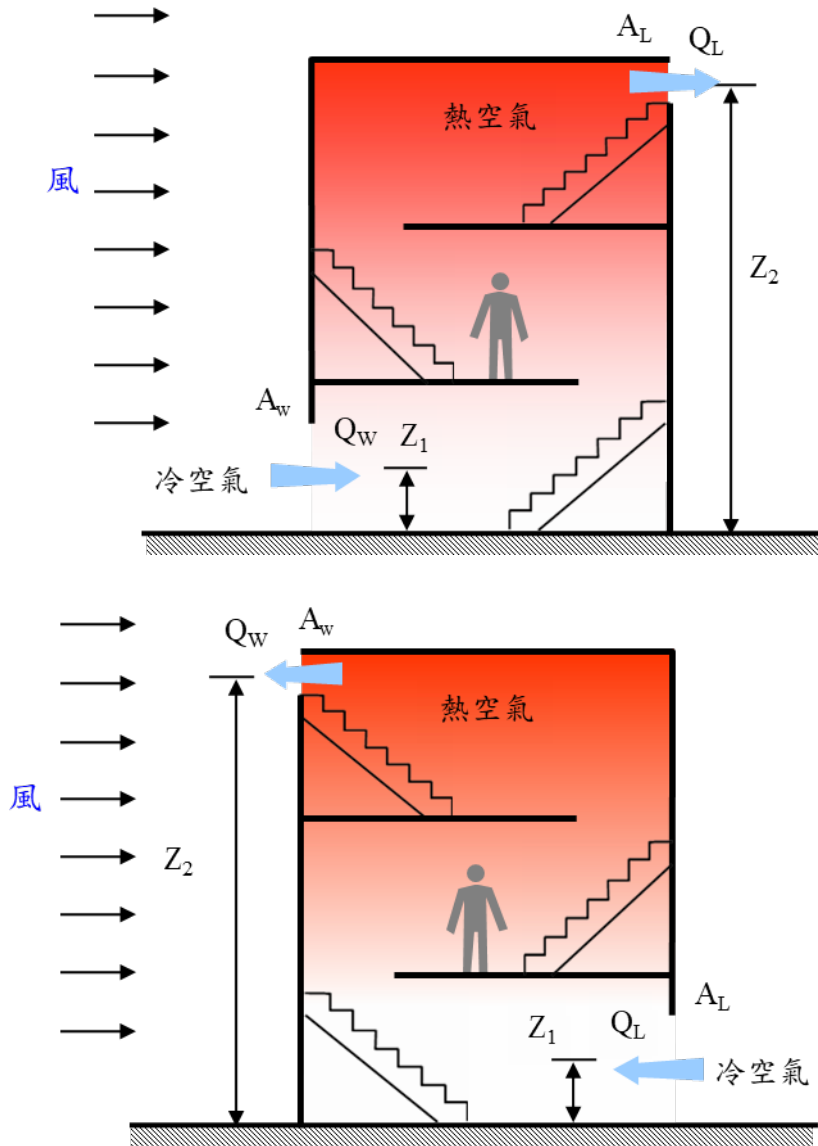


圖 10-1透天式建築浮力通風之示意圖

熱浮力通風與室內外溫差、建築物內部熱源的強度、位置及室內隔間有密切的關係，以上案例為無室內隔間，只有兩個開口之建築物，真實的建築物設計一定比此案例更複雜。若想針對一棟特殊的建築物，評估其熱浮力通風量，則需要尋求自

然通風專家或專業機構的諮詢。對於單一樓層的住宅建築物，高低處開口的高度差 $\Delta z < 3\text{ m}$ 時，風壓通風量遠大於熱浮力通風量，浮力通風量可以忽略不計。

表 10-1 案例 10 的重要參數及通風量

案例	案例 10-1	案例 10-2	案例 10-3
室外風速	$U = 0$	$U = 3.0\text{ m/s}$	$U = 3.0\text{ m/s}$
風向角	-	0	180
$A_w\text{ (m}^2\text{)}$	4 m^2	4 m^2	4 m^2
$A_r\text{ (m}^2\text{)}$	4 m^2	4 m^2	4 m^2
$A^*\text{ (m}^2\text{)}$	1.84 m^2	1.84 m^2	1.84 m^2
室內體積	2000 m^3	2000 m^3	2000 m^3
Q_{model}	$5.7\text{ m}^3/\text{s}$	$8.25\text{ m}^3/\text{s}$	$5.27\text{ m}^3/\text{s}$
ACH	10.3	14.8	9.5

Step 1.建築物迎風面和屋頂各有一個開口，迎風面開口面積 $A_w = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，屋頂開口面積 $A_L = 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ，兩個開口的高度差異 $z_2 - z_1 = 18\text{ m}$ 時。開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw}C_{dL}A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.84\text{ m}^2 \quad (10-6)$$

Step 2.若室外氣溫 $22^\circ\text{C} = 295^\circ\text{K}$ ，室內氣溫 30°C 。當室外風速 $U = 0$ ，通風由熱浮力所主導，因室內外溫差所造成的通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} \right]^{1/2} = 5.70\text{ m}^3/\text{s} \quad (10-7)$$

Step 3. 當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ ，風向角 $\theta = 0^\circ$ ，且低處的開口在迎風面，室內外溫差 $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{pw} = 0.78$ ，背風面的風壓係數 $C_{pr} = -0.40$ 。迎風面開口處的風壓 $P_w = 4.2 \text{ Pa}$ ，屋頂的風壓 $P_r = -2.16 \text{ Pa}$ 。通風量：

$$Q = A^* \left[\frac{2|P_w - P_L|}{\rho} + \frac{2g|\Delta T(z_2 - z_1)|}{T_e} \right]^{1/2} \quad (10-8)$$

$$Q = 1.84 \left[\frac{2(4.2 + 2.16)}{1.20} + \frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} \right]^{1/2} = 8.25 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-9)$$

當室外風速 $U = 3.0 \text{ m/s}$ 的狀況，低處的開口在背風面，開口處的風壓係數 $C_{pL} = -0.47$ ，風壓 $P_L = -2.54 \text{ Pa}$ 。屋頂的風壓係數 $C_{pr} = -0.32$ ，風壓 $P_r = -1.73 \text{ Pa}$ 。通風量：

$$Q = 1.84 \left[\frac{2 \cdot 9.81 \cdot 8 \cdot 18}{295} - \frac{2|-2.54 + 1.73|}{1.20} \right]^{1/2} = 5.27 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10-10)$$

第十一章 辦公空間之風壓通風示範例

本示範例為一棟室內有隔間辦公空間之風壓通風，建築物總高度 20 m，長度為 16 m，寬度為 20 m，建築物的總地板面積 $A_f = 320 \text{ m}^2$ ，此樓層高度 4.0 m，如圖 11.1。四個角隅與兩側分割成為小型的私人辦公室，中央為開放式辦公空間，建築物迎風面共有六個開口，背風面有四個開口，兩個側面各有三個開口，開口面積皆為 $A = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，開口皆無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積 $A^* = 11.59 \text{ m}^2$ 。在屋頂高度處的風速 $U_H = 3.0 \text{ m/s}$ ，周遭無其他影響風場之建築物，迎風面的風壓係數 $C_{p1} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{p2} = -0.47$ ，皆設定與先前的案例相同。

step1. 中央的辦公區的有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.16 \text{ m}^2 \quad (11-1)$$

step2. 帶入風壓通風模式，可得辦公區的總貫流通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.16 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 3.96 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11-2)$$

step3. 換氣率 $\text{ACH} = 31.8 \text{ hr}^{-1}$ 。迎風面左右兩角隅的小辦公室，由迎風面吹入的貫流通風量：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.16 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.50]^{1/2} = 1.57 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11-3)$$

step4. 換氣率為 $\text{ACH} = 88.3 \text{ hr}^{-1}$ 。兩側中間的小辦公室屬於雙側雙開口風切通風，通風量：

$$Q = 0.077 \cdot U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 1 = 0.23 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11-4)$$

「綠建築評估手冊-基本型」(2019) 僅認可三條最短對流路徑，這個案例的辦公區迎風面有四個窗戶，在背風面有兩個窗戶，那一個窗戶是對流窗或是單側窗，計算得之自然通風潛力 VP 可能會有所不同，易生爭議。且流入辦公區的空氣會混合在一起，不易區分其通風路徑，故建議不要以通風路徑來區分對流窗或單側窗。背風面左右兩角隅的小辦公室，

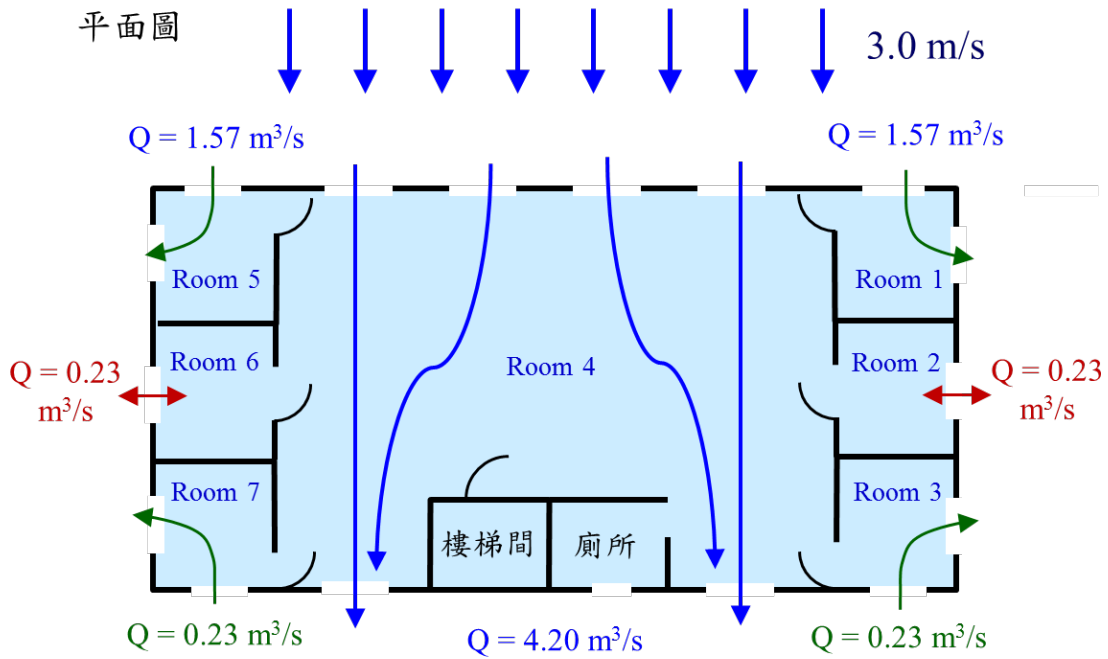
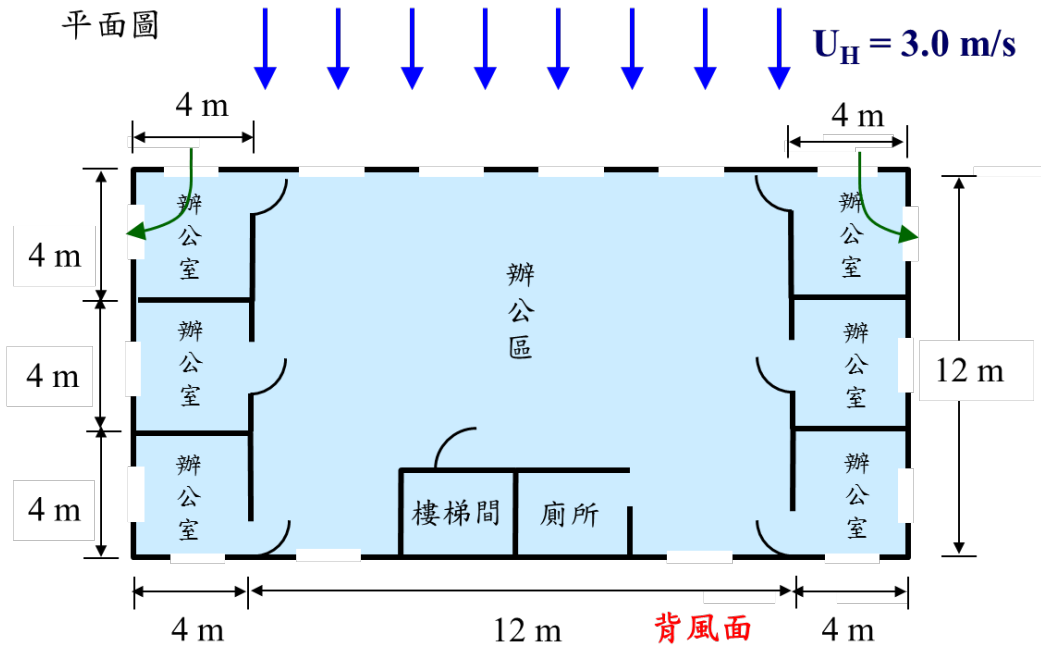


圖 11-1 辦公空間風壓通風(a)示意圖；(b)

表 11-1 辦公室案例各區間的通風量

房間	室內體積 V (m ³)	案例 11-1 風向由北向南		案例 11-2 風向由西向東	
		通風量 Q (m ³ /s)	換氣率 ACH (hr ⁻¹)	通風量 Q (m ³ /s)	換氣率 ACH (hr ⁻¹)
辦公室 1	64	1.57	88.3	0.23	12.9
辦公室 2	64	0.23	12.9	0.94	52.9
辦公室 3	64	0.23	12.9	0.23	12.9
辦公區	448	3.88	31.2	1.38	10.8
辦公室 5	64	1.57	88.3	1.57	88.3
辦公室 6	64	0.23	12.9	1.57	88.3
辦公室 7	64	0.23	12.9	1.57	88.3
平均值	-	-	37.1	-	50.6

step1. 中央的辦公區的有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 1.16 \text{ m}^2 \quad (11-5)$$

step2. 帶入風壓通風模式，可得辦公區的總貫流通風量為：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.16 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 3.96 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11-6)$$

step3. 換氣率 ACH = 31.8 hr⁻¹。迎風面左右兩角偶的小辦公室，由迎風面吹入的貫流通風量：

$$Q_1 = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 1.16 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.50]^{1/2} = 1.57 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11-7)$$

step4. 換氣率為 ACH = 88.3 hr⁻¹。兩側中間的小辦公室屬於雙側雙開口風切通風，通風量：

$$Q = 0.077 \cdot U \cdot A = 0.077 \cdot 3 \cdot 1 = 0.23 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11-8)$$

第十二章 中小學教室之風壓通風示範例

這章的案例為一間中小學教室，在一長排教室之中，教室的長度為 10 m，寬度為 10 m，室內高度 3.5 m，地板面積 $A_f = 100 \text{ m}^2$ ，教室外有一長條的開放式走廊。走廊與教室之間有兩個門，三個窗戶，教室的另一側有四個窗戶，門窗面積皆為 $A = 2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，如圖 31。

step1. 周遭無其他影響風場之建築物，開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 4.06 \text{ m}^2 \quad (12-1)$$

step2. 當室外風速 $U_H = 3.0 \text{ m/s}$ ，迎風面開口處的風壓係數 $C_{pw} = 0.82$ ，背風面的風壓係數 $C_{pL} = -0.47$ (和前面案例相同)。周遭有其他棟教室，兩棟教室總高度皆為 $H = 20 \text{ m}$ ，之間的距離為 $S = 20 \text{ m}$ ，建築物會互相影響其通風。將風壓係數和有效開口面積帶入風壓通風模式，可得總通風量為：

$$Q_l = A^* U \left[C_{p1} - C_{p2} \right]^{1/2} = 4.06 \cdot 3 \cdot [0.82 + 0.47]^{1/2} = 13.84 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (12-2)$$

step3. 當開口高度在 $z/H = 0.75$ ，係數 $A = 1.0$ ，故遮蔽效應的折減係數 K_s ：

$$K_s = A - \exp\left(-0.64 \frac{S}{H}\right) = 1 - \exp(-0.64) = 0.47 \quad (12-3)$$

step4. 故流入教室的總通風量為：

$$Q = K_d K_o K_b K_s Q_0 = 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.47 \times 13.84 = 6.50 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (12-4)$$

教室的換氣率 $ACH = 67$ 。將總通風量平均分給迎風面的四個窗戶，每個窗戶處的平均風速為 0.81 m/s ，教室內的風速會低於窗戶的風速。由此案例看出當教室的門窗正對風向時，有其他建築物的阻礙，貫流通風的效果依然良好。

這個案例迎風面有四個開口，背風面有五個開口，若依照「綠建築評估手冊-基本型」(2019) 僅認可三條最短對流路徑，一槓迎風面窗對三槓背風面窗，可能會造成計算得之自然通風潛力 VP 有所不同，產生爭議，故建議不要以通風路徑來區分對流窗或單側窗。

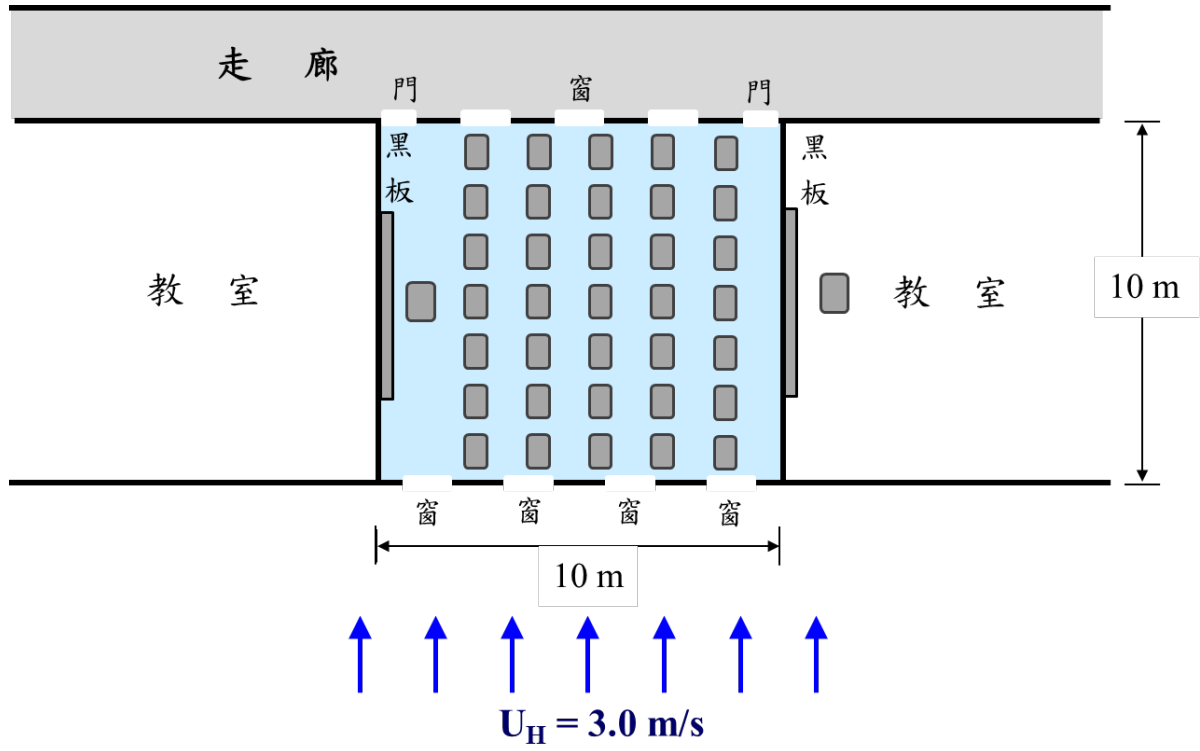


圖 12-1 中小學教室風壓通風之示意圖

第十三章 宿舍風壓通風示範例

此案例為一棟宿舍(或旅館)，建築物總長度為 14 m，寬度為 32 m，高度 20 m，室內居室的高度 4.0 m。每個房間皆是長度為 6 m，寬度為 4 m，地板面積 $A_f = 24 \text{ m}^2$ ，只有一個對外開口，面積皆相同 $A = 2 \text{ m}^2$ ，如圖 31。內部密閉式走廊的寬度 2 m，長度為 32 m，房間至走廊的門是不常開的。當風由此建築物一側吹來，迎風面和背風面開口皆屬於單側通風。

step1. 周遭無其他影響風場之建築物，開口無紗網、無百頁窗狀況下，流量係數皆設定為 $C_d = 0.65$ ，有效開口面積：

$$A^* = \frac{C_{dw} C_{dL} A_w A_L}{(C_{dw}^2 A_w^2 + C_{dL}^2 A_L^2)^{1/2}} = 4.06 \text{ m}^2 \quad (13-1)$$

step2. 周遭無其他影響風場之建築物，在屋頂高度處的風速 $U_H = 3.0 \text{ m/s}$ ，迎風面與背風面房間的風壓通風量可用下式計算：

$$Q = 0.025 \cdot U \cdot A = 0.025 \cdot 3 \cdot 2 = 0.15 \text{ m}^3/\text{s} \quad (13-2)$$

因每個房間的室內體積皆為 96 m^3 ，房間的換氣率為 $\text{ACH} = 5.6$ 。若不計樓梯間，整棟宿舍換氣率為 $\text{ACH} = 5.6 \text{ hr}^{-1}$ 。

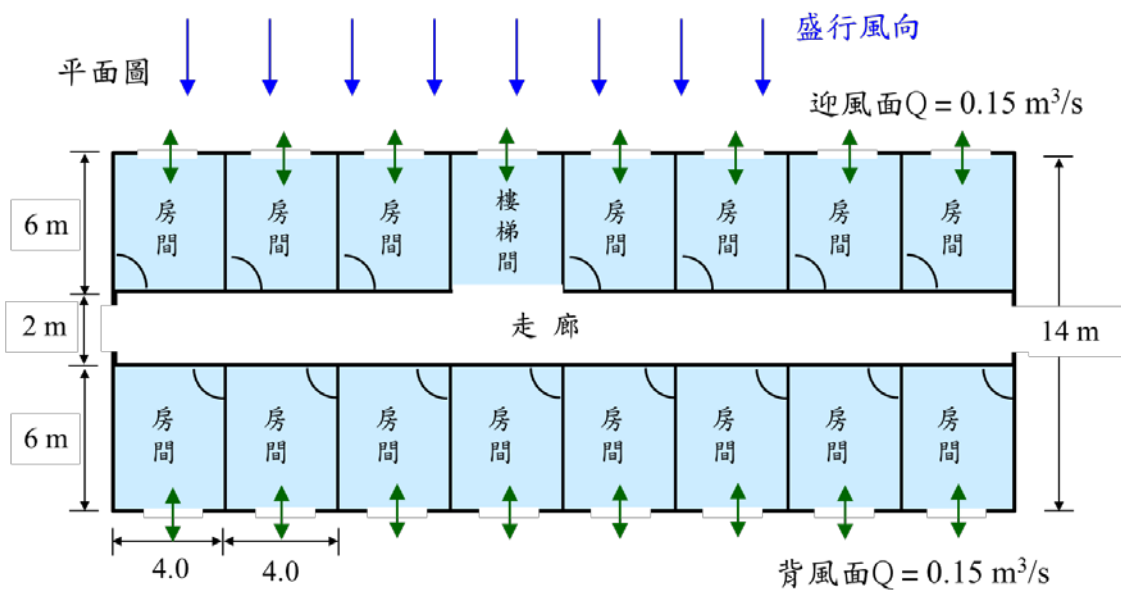


圖 13- 1 宿舍風壓通風之示意圖

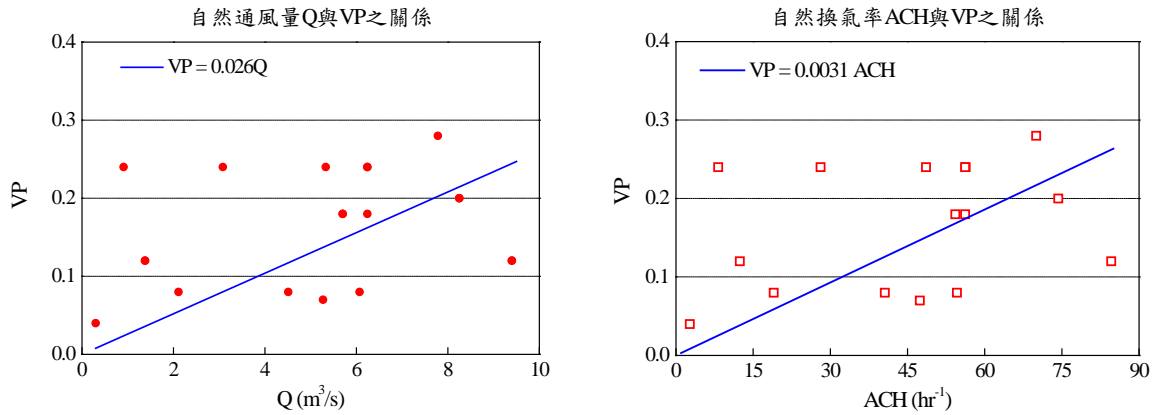


圖 13- 2 (a)自然通風量 Q 與 VP 之關係；(b)換氣率 ACH 與 VP 之關係

表13-1整理不同案例的自然通風潛力VP、自然通風量Q和換氣率ACH，並將結果畫在圖13-2。可看出：因為自然通風潛力VP僅考慮對外開口面積 A_v 、 A_c ，不考慮室外風速和風向，故在相同的開口面積下，算出相同之VP值。但有些案例因為開口不在迎風面上，故算出的通風量Q低。換言之，自然通風量Q較能真實地反映不同狀況下的自然通風潛力。

未來修訂「綠建築評估手冊」可先用本研究之模式計算自然通風量Q和換氣率ACH，再用圖13-2的迴歸經驗式計算自然通風潛力VP，再去評估該建築物採用自然通風時的節能效果。

表 13- 1 不同案例之通風量 Q、自然通風潛力 VP 和換氣率 ACH

Case	風向角	開口	Q (m ³ /s)	ACH	VP	V _{ac}
案例 2-1	0°	雙側雙開口	6.24	56.3	0.24	0.80
案例 2-2	30	雙側雙開口	5.33	48.6	0.24	0.80
案例 2-3	60	雙側雙開口	3.08	28.1	0.24	0.80

案例 2-4	90	雙側雙開口	0.91	8.2	0.24	0.80
案例 3-1	0	單側單開口	0.30	2.7	0.04	1.00
案例 4-2	45	單側雙開口	2.11	19.0	0.08	0.96
案例 6-1	0	三側三開口	7.78	70.0	0.28	0.80
案例 6-4	0	雙側雙開口	6.07	54.6	0.08	0.96
案例 7-1	L = 10 m	雙側雙開口	6.24	56.2	0.24	0.80
案例 7-4	L = 40 m	雙側雙開口	4.51	40.6	0.08	0.96
案例 9-1	0°	雙側三開口	9.40	84.6	0.12	0.91
案例 9-2	90°	雙側三開口	1.38	12.42	0.12	0.91
案例 11-1	0°	雙側多開口	5.7	54.3	0.18	0.83
案例 11-2	90°	雙側多開口	6.24	56.2	0.18	0.80
案例 12	0°	雙側多開口	8.25	74.3	0.20	0.80
案例 13	0°	雙側多開口	5.27	47.4	0.07	0.97

第十四章 自然通風 Excel 試算表使用方式

自然計算表格按照以下步驟輸入並可求得通風量Q

1. 輸入建築物尺寸，高度、寬度、長度及愈計算之樓層之高度。
2. 輸入門窗開口之面積。
3. 由各門窗之面積計算有效開口面積A*。

序	項目	單位	數值
4	平行於風向之尺寸	L (m)	10
5	垂直於風向之尺寸	B (m)	10
6	居室開口離地面高度	H (m)	18
7	居室層內部高度	h (m)	4
8	透風總對面積	A _T (m ²)	100.0
9	居室內部體積	Vol (m ³)	400
10	迎風面透風面積1	A ₁₋₁ (m ²)	2
11	迎風面透風面積2	A ₁₋₂ (m ²)	1
12	迎風面透風面積3	A ₁₋₃ (m ²)	1
13	迎風面透風面積4	A ₁₋₄ (m ²)	0
15	背風面開口面積1	A ₂₋₁ (m ²)	1
16	背風面開口面積2	A ₂₋₂ (m ²)	2
17	背風面開口面積3	A ₂₋₃ (m ²)	0
18	背風面開口面積4	A ₂₋₄ (m ²)	0
20	左側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0
21	左側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0
22	左側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0
23	右側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0
24	右側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0
25	右側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0
28	有效開口面積	A* (m ²)	1.660
29	透風總對面積	A _T (m ²)	100.0
30	自然通風潛力	VP	0.09
31	住宅類建築 自然通風節能效益	V _{ac}	0.95
32	非住宅類建築 自然通風節能效益	V _{ac}	0.85
35	地況C指數	α	0.15
36	透風層厚度	δ (m)	300
37	最近測站風速計高度	H _{ref} (m)	34.9
38	最近測站之年平均風速	V _{ref} (m/s)	3.5
39	離地10 m高度之平均風速	V ₁₀ (m/s)	5.0
40	開口處室外風速	V ₁₄ (m/s)	3.00
41	障礙風級		3
42	盛行風向	以正北為零	北風
43	盛行風向開口與夾角		0
44	迎風面外牆風量係數	C _{p1}	0.80
45	背風面外牆風量係數	C _{p2}	-0.30
46	側面外牆風量係數	C _{p3}	-0.50
47	無因次通風量	Q'	1.06
48	總通風量	ΣQ (m ³ /s)	4.91
49	換氣率	ACH (1/hr)	44.18
50	自然通風潛勢	NVP	

$$VP = \frac{\sum A_{Tj} + \sum 3.0A_{Cj}}{\sum A_{Tj}}$$

$$A^* = \frac{\sum C_{p1}A_{1j} + \sum C_{p2}A_{2j}}{[\sum C_{p1}A_{1j} + \sum C_{p2}A_{2j}]^{1/2}}$$

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^{\alpha}$$

$$Q' = \frac{Q}{U_H A^*} = \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$$

$$Q = V_H A^* \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$$

住宅類建築: $V_{ac} = 1.0$, $VP < 0.05$
 $V_{ac} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{VP - 0.05}{0.15}\right)$ 且 $1.0 \geq V_{ac} \geq 0.80$ $VP \geq 0.05$
 非住宅類建築: $V_{ac} = 1.0$, $VP < 0.05$
 $V_{ac} = 0.9 - 0.1 \left(\frac{VP - 0.02}{0.13}\right)$ 且 $1.0 \geq V_{ac} \geq 0.80$ $VP \geq 0.05$

其意義為因自然通風條件良好而可節省空調能源20%之量
 (相對於全年中央空調辦公建築)

4. 輸入氣象站之風速，利用指數率換算成建築物開口樓層之風速。

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^\alpha$$

The screenshot shows a spreadsheet titled "自然通風潛勢計算表_5.xls (相容模式)". The spreadsheet is divided into several sections:

- Input Parameters (Rows 1-30):** Lists building characteristics such as floor level (單層), dimensions (L=10m, B=10m, H=18m), and various opening areas (A₁ to A₁₄) with their respective coefficients (C_e).
- Diagram (Row 10):** A floor plan of a building with dimensions 10m by 10m. It shows rooms like 房門, 廁所, 客廳, 餐廳, 主臥, and 儲物室. Wind direction is indicated by arrows at the top, and wind velocity (U_H) is shown at the bottom.
- Calculations (Rows 31-50):**
 - VP = $\frac{\sum A_{i1} + \sum 3.0A_{c1}}{\sum A_{c1}}$ (有效開口面積 A* = 1.560 m²)
 - V_{ac} = 1.0, VP < 0.05
 - V_{ac} = 1.0 - 0.2 * $\left(\frac{VP - 0.05}{0.15} \right)$ (if VP > 0.05)
 - Q' = $\frac{Q}{U_H A^*} = \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$
 - Q = V_H A* $\sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$
- Results (Rows 51-55):**
 - 自然通風潛勢 (NVP): 44.18
 - 總通風量 (EQ): 4.91 m³/s
 - 換氣率 (ACH): 44.18 (1/hr)

5. 輸入建築物最大開口與當地盛行風向之夾角。

自然通風潛勢計算表_5.xls [相容模式]

檔案 常用 插入 版面配置 公式 資料 校閱 檢視 團隊

剪下 複製 複製格式 剪貼簿

新細明體 12 A⁺ A⁻

自動換列 通用格式 設定格式化 格式化為的條件 表格

D53

序	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	建築物自然通風 2020/10/20																				
2	中興大學 朱佳仁 教授																				
3																					
4	單層	平行於風向之尺寸	L (m)	10																	
5		垂直於風向之尺寸	B (m)	10																	
6		層高開口離地面高度	H (m)	18																	
7		層高層內部高度	h (m)	4																	
8		通風材料面積	A _T (m ²)	100.0																	
9		層高內部體積	Vol (m ³)	400																	
10		迎風面通風面積1	A ₁₋₁ (m ²)	2	0.65																
11		迎風面通風面積2	A ₁₋₂ (m ²)	1	0.65																
12		迎風面通風面積3	A ₁₋₃ (m ²)	1	0.65																
13		迎風面通風面積4	A ₁₋₄ (m ²)	0	0.65																
14																					
15		背風面開口面積1	A ₂₋₁ (m ²)	1	0.65																
16		背風面開口面積2	A ₂₋₂ (m ²)	2	0.65																
17		背風面開口面積3	A ₂₋₃ (m ²)	0	0.65																
18		背風面開口面積4	A ₂₋₄ (m ²)	0	0.65																
19																					
20		左側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0	0.65																
21		左側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0	0.65																
22		左側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0	0.65																
23		右側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0	0.65																
24		右側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0	0.65																
25		右側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0	0.65																
26																					
27																					
28		有效開口面積	A* (m ²)	1.660																	
29		通風材料面積	A _T (m ²)	100.0																	
30		自然通風潛力	VP	0.09																	
31	存在綠建築	自然通風解能效益	V _{ac}	0.95																	
32	非存在綠建築	自然通風解能效益	V _{ac}	0.85																	
33																					
34		地況C指數	α	0.15																	
35		建築層高度	δ (m)	300																	
36		最近測站風速計高度	H _{ref} (m)	34.9																	
37		最近測站之年平均風速	V _{ref} (m/s)	3.5																	
38		離地10 m高度之平均風速	V ₁₀ (m/s)	5.0																	
39		開口處室外風速	V _o (m/s)	3.00																	
40																					
41		盛行風向	以正北為零	北風																	
42		迎風面開口與夾角	φ																		
43		迎風面外牆風壓係數	C _{p1}	0.80																	
44		背風面外牆風壓係數	C _{p2}	-0.30																	
45		側面外牆風壓係數	C _{p3}	-0.50																	
46		無因次通風量	Q*	1.05																	
47		總通風量	EQ (m ³ /s)	4.91																	
48		換氣率	ACH (1/hr)	44.18																	
49		自然通風潛勢	NVP																		
50																					
51																					

修正係數

$$VP = \frac{\sum A_{1j} + \sum 3.0 A_{2j}}{\sum A_{Tj}}$$

$$A^* = \frac{\sum C_{p1j} A_{1j} \sum C_{p2j} A_{2j}}{[\sum C_{p1j} A_{1j}] + [\sum C_{p2j} A_{2j}]^{1.17}}$$

$$Q^* = \frac{Q}{U_{ref} A^*} = \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$$

$$Q = V_H A^* \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$$

存在綠建築

V_{ac} = 1.0, VP < 0.05

V_{ac} = 1.0 - 0.2 * ((VP - 0.05) / 0.15) 且 1.0 ≥ V_{ac} ≥ 0.80 VP ≥ 0.05

若最高為因自然通風條件良好而可節省空調能源20%之量 (相對於全年中央空調辦公建築)

非存在綠建築

V_{ac} = 1.0, if VP < 0.05

V_{ac} = 0.9 - 0.1 * ((VP - 0.02) / 0.13) 且 1.0 ≥ V_{ac} ≥ 0.80 VP ≥ 0.05

單區間單開口 雙區間雙開口 長建築物 三側三開口 三連棟廠房 多房間 綠建築案例 PMV 教室 辦公室

就緒

6. 建築物迎背風面之風壓係數C_{p1} = 0.80，背風面之風壓係數C_{p2} = -0.30。

自然通風潛勢計算表_5.xls [相容模式]

檔案 常用 插入 版面配置 公式 資料 校閱 檢視 團隊

新細明體 12 A^{*} A^{*} 自動換列 通用格式 設定格式化 格式化為的條件 表格

剪下 複製 複製格式 剪貼簿 字型 對齊方式 數值

D53

序	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	建築物自然通風 2020/10/20																				
2	中興大學 朱佳仁 教授																				
3																					
4	單層	平行於風向之尺寸	L (m)	10																	
5		垂直於風向之尺寸	B (m)	10																	
6		層室開口離地面高度	H (m)	18																	
7		層室層內部高度	h (m)	4																	
8		通風材料面積	A _T (m ²)	100.0																	
9		層室內部體積	Vol (m ³)	400																	
10		迎風面通風面積1	A ₁₋₁ (m ²)	2	0.65																
11		迎風面通風面積2	A ₁₋₂ (m ²)	1	0.65																
12		迎風面通風面積3	A ₁₋₃ (m ²)	1	0.65																
13		迎風面通風面積4	A ₁₋₄ (m ²)	0	0.65																
14																					
15		背風面開口面積1	A ₄₋₁ (m ²)	1	0.65																
16		背風面開口面積2	A ₄₋₂ (m ²)	2	0.65																
17		背風面開口面積3	A ₄₋₃ (m ²)	0	0.65																
18		背風面開口面積4	A ₄₋₄ (m ²)	0	0.65																
19																					
20		左側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0	0.65																
21		左側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0	0.65																
22		左側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0	0.65																
23		右側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0	0.65																
24		右側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0	0.65																
25		右側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0	0.65																
26																					
27																					
28		有效開口面積	A* (m ²)	1.660																	
29		通風材料面積	A _T (m ²)	100.0																	
30		自然通風潛力	VP	0.09																	
31	住宅類建築	自然通風解能效益	V _{ac}	0.95																	
32	非住宅類建築	自然通風解能效益	V _{ac}	0.85																	
33																					
34																					
35		地況C指數	c	0.15																	
36		建築層高度	z (m)	300																	
37		最近測站風速計高度	H _{ref} (m)	34.9																	
38		最近測站之年平均風速	V _{ref} (m/s)	3.5																	
39		離地10 m高度之平均風速	V ₁₀ (m/s)	5.0																	
40		開口處室外風速	V _o (m/s)	3.00																	
41		捕獲風速		3																	
42		盛行風向	以正北為零	北風																	
43		盛行風向與開口容角		0																	
44		迎風面外牆風壓係數	C _{p1}	0.80																	
45		背風面外牆風壓係數	C _{p2}	-0.30																	
46		側面外牆風壓係數	C _{p3}	-0.50																	
47		無因次通風量	Q*	1.05																	
48		總通風量	EQ (m ³ /s)	4.91																	
49		換氣率	ACH (1/hr)	44.18																	
50		自然通風潛勢	NVP																		
51																					

$$VP = \frac{\sum A_{Tj} + \sum 3.0A_{Cj}}{\sum A_{Tj}}$$

$$A^* = \frac{\sum C_{p1} A_{o1} \sum C_{p2} A_{o2}}{[\sum C_{p1} A_{o1}]^2 + [\sum C_{p2} A_{o2}]^2}^{1/2}$$

$$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^{\alpha}$$

$$Q^* = \frac{Q}{U_H A^*} = \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$$

$$Q = V_H A^* \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$$

住宅類建築
 $V_{ac} = 1.0, VP < 0.05$
 $V_{ac} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{VP - 0.05}{0.15}\right) \text{ 且 } 1.0 \geq V_{ac} \geq 0.80 \text{ 且 } VP \geq 0.05$

非住宅類建築
 $V_{ac} = 1.0, \text{ if } VP < 0.05$
 $V_{ac} = 0.9 - 0.1 \left(\frac{VP - 0.02}{0.13}\right) \text{ 且 } 1.0 \geq V_{ac} \geq 0.80 \text{ 且 } VP \geq 0.05$

異常氣候自然通風條件良好時可節約空調能源20%之量
 (相對於全年中央空調辦公建築)

單區間單開口 雙區間雙開口 長建築物 三側三開口 三連棟廠房 多房間 綠建築案例 PMV 教室 辦公室

就緒

7. 可計算風向角為零之貫流通風量Q。

自然通風潛勢計算表_5.xls [相容模式]

檔案 常用 插入 版面配置 公式 資料 校閱 檢視 團隊

剪下 複製 複製格式 剪貼簿

新細明體 12 A* A' 自動換列 通用格式 設定格式化的條件 表格

D53

序號	項目	單位	數值	備註
1	建築物自然通風 2020/10/20			
2	中興大學 朱佳仁 教授			改善係數
3	單層			
4	平行於風向之尺寸	L (m)	10	
5	垂直於風向之尺寸	B (m)	10	
6	層高開口離地面高度	H (m)	18	
7	層高層內部高度	h (m)	4	
8	通風地材面積	A _d (m ²)	100.0	
9	層高內部體積	Vol (m ³)	400	
10	迎風面通風面積1	A ₁₋₁ (m ²)	2	0.65
11	迎風面通風面積2	A ₁₋₂ (m ²)	1	0.65
12	迎風面通風面積3	A ₁₋₃ (m ²)	1	0.65
13	迎風面通風面積4	A ₁₋₄ (m ²)	0	0.65
14	背風面開口面積1	A ₂₋₁ (m ²)	1	0.65
15	背風面開口面積2	A ₂₋₂ (m ²)	2	0.65
16	背風面開口面積3	A ₂₋₃ (m ²)	0	0.65
17	背風面開口面積4	A ₂₋₄ (m ²)	0	0.65
18	左側開口面積1	A ₃₋₁ (m ²)	0	0.65
19	左側開口面積2	A ₃₋₂ (m ²)	0	0.65
20	左側開口面積3	A ₃₋₃ (m ²)	0	0.65
21	右側開口面積1	A ₃₋₄ (m ²)	0	0.65
22	右側開口面積2	A ₃₋₅ (m ²)	0	0.65
23	右側開口面積3	A ₃₋₆ (m ²)	0	0.65
24	有效開口面積	A* (m ²)	1.560	
25	通風地材面積	A _k (m ²)	100.0	
26	自然通風潛力	VP	0.09	
27	修正自然通風潛力	V _{ac}	0.95	
28	修正自然通風潛力	V _{nc}	0.85	
29	地況C指數	α	0.15	
30	建築層高度	δ (m)	300	
31	最近測站風速計高度	H _{ref} (m)	34.9	
32	最近測站之年平均風速	V _{ref} (m/s)	3.5	
33	距地10 m高度之平均風速	V ₁₀ (m/s)	5.0	
34	開口處室外風速	V _o (m/s)	3.00	
35	捕風風機		3	
36	盛行風向	以正北為零	北風	
37	盛行風向開口與夾角		0	
38	迎風面外牆風壓係數	C _{p1}	0.80	
39	背風面外牆風壓係數	C _{p2}	-0.30	
40	側面外牆風壓係數	C _{ps}	-0.50	
41	無因次通風量	Q*	1.05	
42	總通風量	EQ (m ³ /s)	4.91	
43	換氣率	ACH (1/hr)	44.18	
44	自然通風潛勢	NVP		

修正自然通風潛力

$V_{ac} = 1.0$, $V_{nc} = 1.0 - 0.2 \left(\frac{VP - 0.05}{0.15} \right)$ $\geq 1.0 \geq V_{ac} \geq 0.80$ $VP < 0.05$ $VP \geq 0.05$

計算自然通風條件時可折的空氣流通20%之意 (相對於全年中央空調型辦公室)

修正自然通風潛力

$V_{ac} = 1.0$, $V_{nc} = 0.9 - 0.1 \left(\frac{VP - 0.02}{0.13} \right)$ $\geq 1.0 \geq V_{nc} \geq 0.80$ $VP < 0.05$ $VP \geq 0.05$

$V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10} \right)^{0.6}$

$Q^* = \frac{Q}{U_H A^*} = \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$

$Q = V_H A^* \sqrt{C_{p1} - C_{p2}}$

單區間單開口 雙區間雙開口 長建築物 三側三開口 三連棟廠房 多房間 綠建築案例 PMV 教室 辦公室

8. 當風向角介於為零 $0^\circ < \theta < 80^\circ$ 之間可用餘弦公式計算風向之折減係數:

$$K_d = \cos\theta$$

9. 當風向角 $\theta > 80^\circ$, 屬於風切通風, 可用下式計算通風量 Q:

$$Q = C \cdot U \cdot A$$

當建築物為單側單開口時, $C = 0.018$; 當建築物開口在迎風面時, $C = 0.025$; 當建築物為單側雙開口時, $C = 0.053$; 當建築物為雙側各一單開口時, $C = 0.077$;

10. 當建築物縱深 L 大於 10m 時, 可用下式計算深度之折減係數:

$$K_L = \left(\frac{L}{10} \right)^{-0.115}$$

11. 當建築物開口外部有不透風之室陽台圍牆，遮蔽部份之開口面積時可帶入陽台之折減係數 $K_b = 0.67$
12. 當建築物開口有設置紗窗或百葉窗時，可帶入紗窗之折減係數 $K_o = 0.77$ ；百葉裝之折減係數 $K_o = 0.92$ ；外推窗 $K_o = 0.31$ 。

參考文獻

1. 周鼎金 (1995) *建築物理*，茂榮圖書公司印行，台北。
2. 陳啟中 (1996) *建築物理概論*，詹氏圖書公司印行，台北。
3. 林憲德 (1996) *熱濕氣候的綠色建築計畫*，詹氏書局印行，台北。
4. 江哲銘 (1997) *建築物理*，三民書局印行，台北。
5. 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。
6. 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。
7. 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。
8. 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。
9. 朱佳仁 (2006) *風工程概論*，科技圖書出版公司印行，台北。
10. 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。
11. 張瑋如 (2006) *兩層樓建築物橫流型自然通風模式的CFD研究*，*建築學報*，Vol.56, 133-149。
12. 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。
13. 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。
14. 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。
15. 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。
16. 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。
17. 王家瑩 (2012) *CFD數值模擬評估併用機械通風之輻射冷板系統於亞熱帶地區之應用—以台灣科技大學綜合研究大樓808辦公室為例*，國立台灣科技大學建築研究所博士論文。

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, 2009年9月, 17~33。
19. 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。
20. 郭建源 (2010) *以風洞試驗建立行人風場環境影響評估準則之研究*。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
21. 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之研究，*建築學報*，Vol.78, 2011年12月, 107~121。
22. 陳海曙 (2011) *全球熱溼氣候自然通風綠建築*，詹氏圖書印行，台北。
23. 許皓香 (2013) *濕熱氣候區中大型建築物之熱對流及浮力通風之應用*，國立台灣科技大學建築研究所博士論文。
24. 姜柏帆 (2013) *室內障礙物對建築物自然通風影響之研究*，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
25. 黃瑞隆 (2013) *複合式通風應用於臺灣潛力分析之研究*。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
26. 李怡萱 (2014) *建築室內自然通風評估之研究*，國立成功大學建築研究所碩士論文。
27. 黃瑞隆 (2015) *自然通風與室內熱環境之實證研究*。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
28. 蔡易廷 (2015) *單側雙開口建築物通風之實驗研究*，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
29. 陳侃君 (2015) *不同開口對風壓通風量之數值模擬*，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
30. 王家瑩 (2017) *綠建築自然通風潛力評估方法之研究*，內政部建築研究所研究報告。
31. 內政部建築研究所 (2015) *綠建築評估手冊 - 基本型*，內政部建築研究所。
32. 內政部建築研究所 (2019) *綠建築評估手冊 - 基本型*，內政部建築研究所。
33. 朱佳仁、吳思磊 (2019) 一氧化碳在有隔間建築內部傳輸之物理模式，*勞動及職業安全衛生研究季刊*，第27卷第3期，2019年9月，57-70。
34. Allard, F, and Santamouris, M., *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*, James and James Ltd., 1998.

35. Allocca, C., Chen, Q., Glicksman, L.R. Design analysis of single-sided natural ventilation, *Energy and Buildings*, 2003; 35, 8, 785-795.
36. ASHRAE (2004) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55:7-8.
37. Awbi, H.B. *Ventilation of Buildings*, 2nd ed., Taylor and Francis; 2003, p.522.
38. Aynsley, R.M, Melbourn, W. and Vickery, B.J. *Architectural Aerodynamics*, Applied Science Publishers; 1997.
39. Bu, Z., Kato, S., Takahashi, T., Wind tunnel experiments of wind-driven natural ventilation rate in residential basements with areaway space, *Building and Environment* 2010; 45: 2263-2272.
40. Chang, W.R. Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building, *Building and Environment*, 2006; 41: 549-556.
41. Chen, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 2009; 44: 848-858.
42. Chu, C.-R., Chiu Y.-H., Chen Y.-J., Wang Y.-W., and Chou C.P., Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross ventilation, *Building and Environment*, 2009; 44: 2064-2072.
43. Chu, C.-R., Chiu Y.-H., and Wang Y.-W. An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings, *Energy and Buildings*, 2010; 42 (5): 667-673.
44. Chu, C.-R., and Wang Y.-W. The loss factors of building openings for wind-driven ventilation. *Building and Environment*, 2010; 45 (10): 2273-2279.
45. 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.
46. Chu, C.-R., and B.-F. Chiang, Wind-driven cross ventilation with internal obstacles. *Energy and Buildings*, 2013; 67, 201-209. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.086.
47. Chu, C.-R., and B.-F. Chiang, Wind-driven cross ventilation in long buildings. *Building and Environment*, 2014; 80, 150-158. doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.017.
48. Chu, C.-R., Chiu, Y.H. Tsai, Y.T. and Wu, S.L. Wind-driven natural ventilation for buildings with two openings on the same wall. *Energy and Buildings*, 2015; 108: 365-372. doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.041.

49. Chu, C.-R. and Wu, S.-L., A transient transport model for gaseous pollutants in naturally-ventilated partitioned buildings. *Building Simulation*, 2017; 10(6): doi.10.1007/s12273-017-0390-z.
50. Chu, C.-R. and Lan, T.-W. Effectiveness of ridge vent to wind-driven natural ventilation in monoslope multi-span greenhouses, *Biosystems Engineering*, 2019; 186, 279-292.
51. Dascalaki, E., Santamouris, M., Bruant, M., Balaras, CA, Bossaer, A, Ducarme, D, Wouters, P., Modeling large openings with COMIS, *Energy and Buildings*, 1999; 30: 105-115.
52. Etheridge, D.W. and Sandberg, M., *Building Ventilation: Theory and Measurement*, John Wiley and Sons, 1996, p.724.
53. Etheridge D.W. *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*, John Wiley and Sons, 2011, p.454.
54. Evola, G. and Popov V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings, *Energy and Building*, 2006; 38 (5), 491-501.
55. Fanger, P.O. and Christenesn, N.K. Prediction of Draft, *ASHRAE Journal*, 1987, 30-31.
56. Fanger, P.O., Melikov, A.K., Hanzawa, H. Ring J., Air turbulence and sensation of draught, *Energy and Buildings*, 1988; 12 (1): 21-39.
57. Feustel, H.E. (1999) COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model, *Energy and Buildings*, 1999; 30: 3-18.
58. Ghiaus, C., F. Allard, M. Santamouris, C. Georgakis, F. Nicol, Urban environment influence on natural ventilation potential, *Building and Environment*, 2006; 41 (4), 395-406.
59. Heiselberg, P., Bjorn, E., Nielsen, P.V. Characteristics of air flow from open windows, *Building and Environment* 2001; 36: 859-869.
60. Hu, C-H, Ohba, M., Yoshie R. CFD modeling of unsteady cross ventilation flows using LES. *J. of Wind Eng. & Industrial Aerodyn.* 2008; 96: 1692-1706.
61. 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; 34 (6): 707-720.

62. 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. of Wind Eng. & Industrial Aerodyn.* 2003; 91: 331-353.
63. Launder, B.E. and Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flow, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974; 269-289.
64. Linden, P.F. The Fluid Mechanics of Natural Ventilation, *Annual Review of Fluid Mech.* 1999; 31: 201-238.
65. Livermore, S.R. and A. W. Woods, Natural ventilation of multiple storey buildings: The use of stacks for secondary ventilation, *Building and Environment*. 2006; 41: 1339-1351.
66. Karava, P., Stathopoulos, T., Athienitis, AK. Wind induced natural ventilation analysis, *Solar Energy* 2007; 81: 20-30.
67. Kurabuchi, T., Ohba M., Endo, T., Akamine, Y., Nakayama, F. Local dynamic similarity model of cross-ventilation, Part 1: Theoretical framework, *Inter. J. of Ventilation*. 2004; 2 (4): 371-382.
68. Ohba, M., Irie, K., and Kurabuchi, T. Study on airflow characteristics inside and outside a cross-ventilation model, and ventilation flow rates using wind tunnel experiments, *J. of Wind Eng. and Industrial Aerodyn.* 2001; 89: 1513-1524.
69. 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, 35:257-271.
70. Roulet, C.-A. *Ventilation and Airflow in Buildings*, Earthscan; 2008, p.39-42.
71. Santamouris, M. and Wouters, P. *Building Ventilation: The state of the art*, Earthscan, 2006.
72. Tong, Z., Y. Chen, A. Malkawi, 2017. Estimating natural ventilation potential for high-rise buildings considering boundary layer meteorology, *Applied Energy*, Vol.193, 276-286.
73. Wood, A. and Salib, R. *Natural Ventilation in High-rise Office Buildings*, Taylor & Francis Co., 2013. p.183.
74. Yin, W., G. Zhang, W. Yang, X. Wang, Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China, *Building and Environment*, 2010, 45 (2), 338-344.