

集合式住宅對建築物自然通風的影響

內政部建築研究所研究報告

中 華 民 國 101 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)

10162B001

集合式住宅對建築物自然通風的影響

研究主持人：陳瑞鈴

共同主持人：朱佳仁

研究員：劉文欽、陳玠佑

研究助理：姜柏帆、李勝雄

內政部建築研究所研究報告

中華民國 101 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

表次.....	III
圖次.....	IV
摘要.....	VII
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究目的.....	2
第三節 研究方法.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 建築通風.....	5
第二節 通風模式.....	7
第三節 研究文獻.....	10
第三章 風洞實驗.....	17
第一節 儀器設備.....	17
第二節 實驗結果.....	21
第四章 數值模式.....	33
第一節 模式驗證.....	33
第二節 模式驗證.....	34
第三節 參數研究.....	38
第五章 結論與建議	69
附錄一 期初審查會議紀錄與意見回覆表	71
附錄二 期中審查會議紀錄與意見回覆表	74
附錄三 期末審查會議紀錄與意見回覆表	77

附錄四 符號表.....	81
--------------	----

表 次

表 4-1 比較積分法和由通風模式計算得之通風量	63
表 4-2 系列 A 模擬參數	64
表 4-3 系列 A 的模擬結果	64
表 4-4 模擬各系列的參數表	65
表 4-5 系列 B 的參數表	66
表 4-6 系列 B 的模擬結果 (開口高度 $z = 0.75H_b$)	66
表 4-7 系列 C 的參數表	67
表 4-8 系列 C 的模擬結果 (開口高度 $z = 0.75H_b$)	67
表 4-9 系列 D 的參數表	68
表 4-10 系列 D 的模擬結果 (開口高度 $z = 0.75H_b$)	68

圖 次

圖 2-1 貫流通風和單側通風之示意圖	6
圖 2-2 浮力通風之示意圖	6
圖 2-3 受鄰近建築物影響之主建築物示意圖	16
圖 3-1 建築研究所風洞實驗室配置圖	19
圖 3-2 建築物模型置於風洞內之照片圖	19
圖 3-3 壓力掃描器	20
圖 3-4 皮托管	20
圖 3-5 風壓實驗配置之示意圖	20
圖 3-6 建築前方來流之風速分佈圖(a)平均風速; (b)紊流強度	22
圖 3-7 建築物模型表面中心線之風壓係數分佈圖(a)迎風面; (b)背風面	23
圖 3-8 建築物無因次貫流通風量(a)通風量之垂向分佈圖; (b) 通風量與 前後棟間距關係圖	24
圖 3-9 冂型建築物模型示意圖	25
圖 3-10 L 型建築物模型示意圖	26
圖 3-11 冂型建築物與 L 型建築物模型之上視圖	26
圖 3-12 建築物模型置於風洞內之照片圖(a)冂型建築物模型(b)L 型建築 物模型.....	27
圖 3-13 風向角 0 度, L 型模型風壓係數之比較	28
圖 3-14 風向角 0 度, 冂型模型風壓係數之比較.....	28
圖 3-15 風向角 0 度, L 型模型各表面中心線之風壓係數	29
圖 3-16 風向角 90 度, L 型模型各表面中心線之風壓係數	29
圖 3-17 風向角 180 度, L 型模型各表面中心線之風壓係數	30
圖 3-18 風向角 0 度, 冂型模型各表面中心線之風壓係數.....	30

圖 3-19 風向角 90 度， Γ 型模型各表面中心線之風壓係數.....	31
圖 3-20 風向角 180 度， Γ 型模型各表面中心線之風壓係數.....	31
圖 3-21 風向角 0 度，L 型模型 B 面風壓係數分佈圖	32
圖 3-22 風向角 0 度， Γ 型模型 I 面風壓係數分佈圖	32
圖 4-1 計算域的示意圖	41
圖 4-2 計算網格分佈圖 (a)側視圖; (b)俯視圖	42
圖 4-3 比較單棟建築物迎風面和背風面的壓力係數圖	43
圖 4-4 比較三種模式模擬之迎風面和背風面的壓力係數結果.....	44
圖 4-5 比較不同擾動速度設定之模擬結果.....	45
圖 4-6 兩層樓建築物的速度向量圖，建築物深度 $L_b/H_i = 1.07$ (a)開口位於二樓; (b) 二層樓皆有開口.....	46
圖 4-7 兩層樓建築物有無開口其迎風面和背風面中心線的壓力係數圖 (a)迎風面; (b)背風面.....	47
圖 4-8 兩層樓建築物的速度向量圖，建築物深度 $L_b/H_i = 3.57$ ，開口位於二樓.....	48
圖 4-9 建築物深度影響迎風面和背風面中心線的壓力係數圖	49
圖 4-10 建築物深度對通風量之影響	50
圖 4-11 建築物開口中心線上的縱向風速之分佈	50
圖 4-12 雙棟建築物間距 $S = 1 \sim 3H_b$ 下風建築物的壓力係數.....	51
圖 4-13 雙棟建築物間距 $S = 4 \sim 6H_b$ 下風建築物的壓力係數.....	52
圖 4-14 不同建築物間距其雙棟建築物的速度向量圖	53
圖 4-15 不同建築物間距下風建築物的壓力係數圖	54
圖 4-16 不同建築物間距影響下風建築物的通風量	55
圖 4-17 不同建築物間距 S/H_b 下風建築物的流量分佈圖	55
圖 4-18 不同高度的上風建築物之速度向量圖($y/W_b = 0$)	56

圖 4-19 不同高度的上風建築物之下風建築物的壓力係數圖.....	57
圖 4-20 不同高度的上風建築物對下風建築物通風量之影響.....	58
圖 4-21 不同高度的上風建築物之無因次流量分佈圖.....	58
圖 4-22 不同寬度之上風建築物的速度向量圖($z/H_b = 0.5$)	59
圖 4-23 不同寬度之上風建築物的下風建築物壓力係數圖	60
圖 4-24 不同寬度之上風建築物對下風建築物通風量的影響.....	61
圖 4-25 不同寬度之上風建築物的下風建築物的無因次流量分佈圖.....	61
圖 4-26 不同寬度之建築物的速度向量圖，開口中心高度 $z/H_b = 0.816$ (a) $W_b = 3.0\text{ m}$; (b) $W_b = 6.0\text{ m}$	62

摘 要

關鍵詞：建築物通風，風壓通風，集合式住宅，風洞實驗，計算流體動力學

一、研究緣起

都會地區的集合式住宅大多緊密相連，建築物阻礙空氣流動，造成室外風場微弱，空氣不易流通。因此即使建築物前後皆有向外的窗戶開口，周圍建築物的遮蔽效應仍會導致建築物通風不良的狀況，室內容易產生悶熱、不舒適的居室環境。本研究採用風洞實驗及計算流體動力學模式研究受周遭其他建築物影響的集合式住宅建築物表面風壓及通風量換氣率。探討參數包括室外風場（包括風速、風向角）、建築物的大小、間距及排列方式，期望能定量評估集合式住宅的通風量。

二、研究方法及過程

本研究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單棟 L 型、門型等建築物及前後排列的雙棟矩形建築物的表面風壓係數。實驗數據可用於探討集合式住宅對建築物自然通風的影響，及建築物在其他建築物的遮蔽下之風壓通風。本計畫亦利用計算流體動力學(CFD)模式探討矩形建築物在上風建築物的遮蔽效應下之表面風壓係數。數值模式的風壓係數與風洞實驗量測值結果互相比對，發現大渦模式(LES)模擬的結果與風洞實驗所量測值相當吻合，其誤差在合理的範圍內，但 $k-\epsilon$ 模式的模擬結果較差。

三、重要發現

本研究利用大渦模式來進行了一系列的數值模擬，計算下風建築物受相鄰建築遮蔽效應的通風量，評估建築物之間的間距、上風建築物高度和寬度的影響。研究結果發現：

(1) 單棟建築物的深度變大時，風力驅動的貫流通風量會因為背風面的風壓變

大，而導致通風量變小約20%，當建築物深度 $L_b/H_i \geq 4.0$ 時，建築物的通風量就不再下降。

- (2) 兩棟相同高度、寬度的建築物之間的間距小於4倍的建築物高度，下風建築物受到遮蔽效應，貫流通風量將顯著的減少。
- (3) 當上風建築物的高度 $H_u \geq 1.5H_b$ 和寬度 $W_u \geq 1.5W_b$ 時，背風面壓力係數會高於迎風面的壓力係數，會產生逆向通風的現象。因此，大渦模式的數值模擬是可以模擬實驗情況進行探討。
- (4) 單棟建築物的寬度變寬一倍時，對建築物貫流通風量的影響並不顯著。

四、主要建議事項

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

建議一

研究住宅建築物採用自然通風及機械通風所消耗的電力能源：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

本計畫探討集合式住宅建築物的自然風壓通風量，及周遭建築物對主建築物風壓通風的影響，但並無評估自然通風對建築節能量，未來可利用本研究之成果評估採用自然通風及機械通風的建築物所使用的能源及節能的效果，並與實際建築物所使用的電力能源比較。此研究可讓自然通風在台灣地區有更好的發展，更廣泛地應用在台灣地區各種建築物的通風設計。

建議二

調查各種建築物使用自然通風的概況：長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

調查台灣各種建築物，譬如住宅、學校、宿舍及辦公大樓等建築在不同的季節狀況下，使用自然通風的概況及所使用的電力能源。後續的研究可提升自然通風在台灣建築界的使用率，讓綠建築真正地在台灣落實，創造舒適的室內環境，並減少建築物所消耗的能源。

Abstract

Keywords: Building ventilation, Multi-family dwelling unit, Surrounding buildings, Wind tunnel experiment, Computational Fluid Dynamics

In densely-populated areas, where buildings are grouped closely together, wind-driven ventilation is strongly influenced by the surrounding structures. The sheltering effect of the surrounding built-up environment can reduce the wind speed and wind-driven ventilation rate. This study used wind tunnel experiment and a three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) model to investigate the influences of adjacent building on wind-driven natural ventilation of the downwind building. The influences of building depth, height, width and spacing between the buildings were systemically studied. The simulation result demonstrated that the ventilation rate decreases as the building depth increases. In addition, the ventilation rate, compared to a single building, was significantly reduced by 50% when the spacing between two buildings is less than three times of building height.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

建築物採用自然通風不僅可以去除有害的室內污染物提供室內新鮮空氣，改善室內空氣品質(Indoor Air Quality, IAQ)，亦可避免使用冷氣空調耗損能源，達到建築節能之目的(Allard and Santamouris, 1998; Roulet, 2004)。依據 2000 年國際能源總署(IEA)的報告(Annex 35)中指出，歐洲國家的辦公樓有效利用自然通風可以降低建築能耗達 50% 以上。英國建築研究機構(British Research Establishment, Conservation Support Unit, BRE CSU)的研究結果表明，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 $14 \sim 41 \text{ KWh/m}^2$ ，減少的費用為 $40 \sim 100$ 台幣/ m^2 。黃國倉(2006)的研究指出：台灣一般辦公大樓空調耗電比率佔建築能耗約 45%，長期累積下來所耗費的能源亦十分可觀。

自然通風主要依賴室外自然的風力及室內外的溫差（浮力）驅使室內外空氣交換、流動。受到許多因素的影響，譬如建築物外的風速、風向、建築物的幾何外型、周遭建物的配置、門窗開口的面積大小、位置、形式、室內傢俱擺設和隔間等因素。故建築物使用自然通風有其限制，當室外無風，或室外氣溫太高及太低，或室外空氣污染太嚴重時，自然通風便不適用。且室外風速和氣溫與時俱變，自然通風不易控制。自然通風的優點為節省能源，但缺點為通風量受上述條件的影響，較難控制通風量和室內的空氣品質，不適用於大型的公共空間，譬如賣場、戲院、演講廳等。但自然通風適用於家庭、住宅等小型空間。若要定量評估自然通風的適用性，必須對建築物基地的風場及氣候條件的變化有深入的瞭解。

除此之外，在都會地區建築物大多緊密相連，建築物阻礙空氣流動，造成室外風場微弱，空氣不易流通。即使建築物前後皆有向外的窗戶開口，周圍建築物的遮蔽效應會降低風速和風力驅動的通風量，使得風力驅動之貫流通風(wind-driven cross ventilation)受周圍建築物的影響而減弱，導致建築物通風不良的狀況，室內容易產生悶熱、不舒適的居室環境。

內政部建築研究所 99 年度的研究計畫「台灣地區建築物室內自然通風模式

之建立研究」所發展的 TAIVENT (Taiwan Natural Ventilation Model) 模式利用流體質量守恆原理與通風理論，可計算多區間建築物(Multi-zone)的通風量與換氣率。模式利用台灣中央氣象局各地氣象站的氣象資料，或自行輸入建築基地的盛行風向、平均風速、溫濕度等氣象資料，配合風洞實驗量測得之建築物表面風壓，便可計算多區間建築的風壓通風之通風量或換氣率。但該模式僅考慮單棟、矩形建築物之風壓通風的狀況，未考量熱浮力效應對自然通風之影響。建築研究所 100 年度的研究計畫「熱浮力效應對建築物室內通風影響之研究」將 TAIVENT 通風模式加上熱浮力通風的計算，計算有室內外溫差時的通風量與換氣率。但該模式仍然僅考慮單棟建築物的通風狀況，不計周遭建築物對主建築物通風的影響。

第二節 研究目的

台灣都會區的住宅大多屬於密集興建的公寓、高層住宅大樓等集合式住宅 (Multi-family dwelling unit)。這類的集合式建築往往過於密集，會影響建築物的自然通風，前人的通風研究皆未針對此問題進行深入的研究。本研究之目的在了解都會地區，集合式住宅的自然通風受周圍建築物影響狀況下，特別是風力驅動的自然通風。本計畫結合風洞實驗與自然通風的計算模式，探討都會地區中、高樓層集合式住宅的風壓通風特性，譬如矩形、L 字型、門字型等建築物，其間距、座向等建築設計對風壓通風的影響，以找出最能利用當地氣象條件的自然通風之建築設計。

本計畫利用通風理論與流體質量守恆原理，建構一個適用於台灣地區的自然通風模式，可計算多區間建築物(Multi-zone)的通風量與換氣率。模式利用台灣中央氣象局各地氣象站的氣象資料，或自行輸入建築基地的盛行風向、平均風速、溫濕度等氣象資料，配合風洞實驗量測得之建築物表面風壓，便可計算多區間建築的風壓通風之通風量或換氣率。並考慮周遭建築物對主建築物風壓通風的影響，讓建築師可以有效利用台灣氣候條件的優勢，避開其缺點，設計出自然通風的綠建築，有效地利用自然通風協助或維持室內空氣品質和居住環

境，讓自然通風真正地在台灣落實，創造舒適的室內環境，並減少建築物所消耗的能源。

第三節 研究方法

本計畫利用風洞實驗量測矩型、L 字型、門字型等縮尺建築物模型的表面風壓係數，風洞實驗製作建築物縮尺模型，放置於風洞邊界層流之中。風洞實驗量測得之風壓係數結果可代入風壓通風模式，來計算受周遭建築物影響時之集合式住宅的自然通風量。以利建築師評估各種狀況下，集合式住宅的換氣率，以設計出最能配合當地氣候條件的通風設計。以減少建築物對機械通風的依賴，有效達到建築物節能、減碳之目的，並創造舒適的室內環境。

風洞實驗利用建築研究所的風洞實驗室量測各種外型建築物，在不同排列方式下的表面風壓分佈，並將量測得之建築物表面風壓係數建立成一個資料庫。供通風模式利用來計算住宅式建築物的通風量與換氣率，評估自然通風對於台灣常見建築物的適用性及特性。

本研究報告共包括五章，主要章節內容為：第一章為緒論，說明研究的背景、研究目的、研究方法與過程及各章的內容；第二章介紹建築通風的理論及相關的國內外通風研究文獻，包括室內換氣率與通風量的計算、各種通風計算模式的應用；第三章描述風洞實驗的儀器及實驗結果；第四章描述數值模式、計算流程及結果；第五章為結論與建議事項。

第二章 文獻回顧

第一節 建築通風

通風之目的在於提供新鮮的空氣，及移除或稀釋建築物之內的污染物，使得室內有建築物使用者可以接受的空氣品質。建築物內空氣替換的頻率可用換氣率(Air exchange rate)來定義：

$$I = \frac{Q}{V}$$

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

建築物的通風方式可分為自然通風(Natural ventilation)和機械通風(Mechanical ventilation)。自然通風是依靠建築物內外的氣壓差異或溫度差異所造成的空氣流動；機械通風又稱為強制通風，是利用通風機械促使室內外的空氣交換和流動。自然通風有節約能源的功效，因此在建築物設計的最初階段，應須考量自然通風，自然通風可分為風壓通風和浮力通風兩種方式(Linden, 1999; 朱佳仁, 2006)。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，氣流經由通風口相互流動而產生的室內外空氣之交換。當建築物迎風面和背風面皆有開口（門窗），且開口正對著風向，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)，如圖 2-1 所示，其通風效果最佳。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）。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。
- (2)浮力通風：因為室內外溫度差異所造成的浮力可以促使空氣上下對流。若一棟建築物內有垂向的溫度差異，且上下皆有開口（門窗），則熱空氣會由上方的開口流出，而外界的冷空氣會由下方開口補充。若大樓內有挑高的中庭

(Atria)或通風豎井，便可利用浮力通風將熱空氣排出，如圖 2-2 所示。

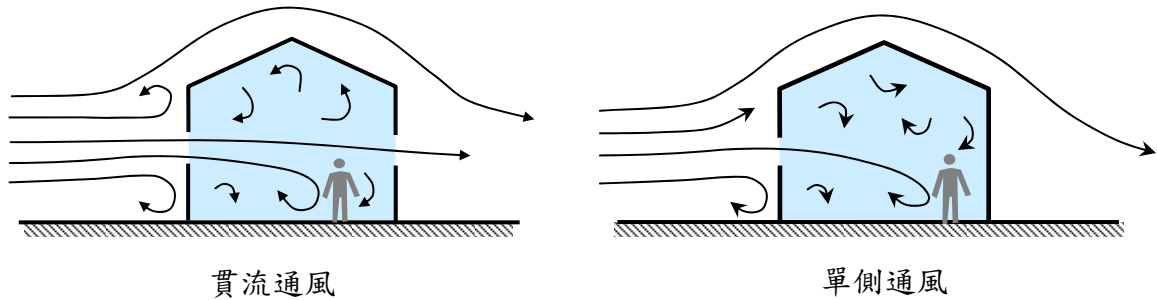


圖2-1 貫流通風和單側通風之示意圖

資料來源：本研究整理

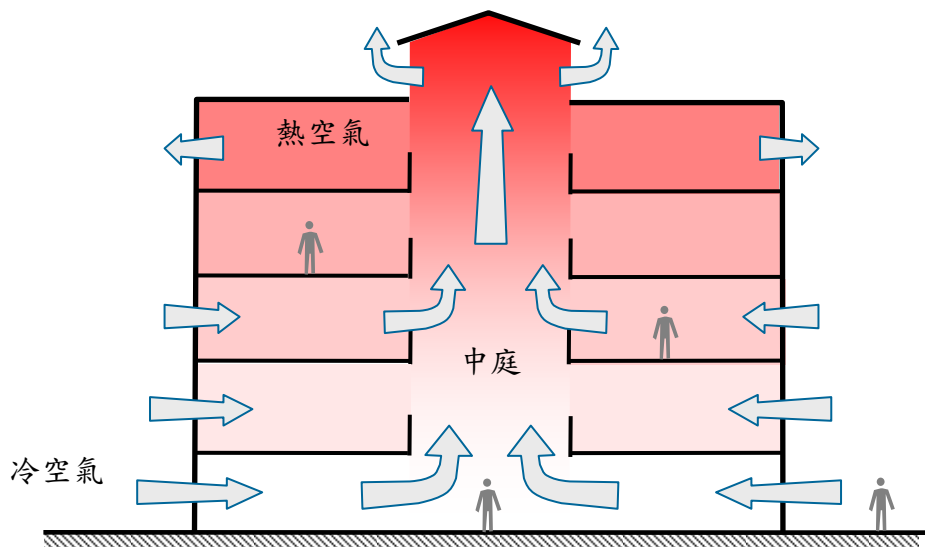


圖 2-2 浮力通風之示意圖

資料來源：本研究整理

浮力通風可用無因次之阿基米德數(Archimedes number)加以量化：

$$Ar = \frac{g\Delta\rho\sqrt{A}}{\rho U^2}$$

式中 A 為開口面積， U 為室外風速， $\Delta\rho = |\rho - \rho_e|$ 為室內上層空氣的密度 ρ 與室外空氣的密度 ρ_e 的差異， g 為重力加速度， $g\Delta\rho/\rho$ 為流場中因為密度差異所產生的浮力加速度。阿基米德數可視為浮力通風與風壓通風強度之比，當室內外無

溫度差異 $\Delta\rho=0$ 時，阿基米德數 $Ar=0$ ，計算通風量時僅需考慮風壓通風；當室外無風的狀況 $U=0$ ，阿基米德數 $Ar\rightarrow\infty$ ，通風由熱浮力所主導。阿基米德數愈大，浮力通風愈重要(Awbi, 2003)。

第二節 通風模式

不論何種通風方式，其通風量與對室內溫度、濕度及空氣品質的影響可藉由通風模式來評估。而計算室內風場及其傳輸現象的通風模式可分為：區塊模式和全域模式，以下分述之：

- (1) 多區塊模式(Multi-zone model)：將室內空間依照其隔間分為數個區塊(Zone)，將每一個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，區塊內某物質濃度的變化必定是因為該物質流入（或流出）區塊或是因為該物質發生反應所造成的。因此計算在一段時間 Δt 之內，流入和流出區塊的風量和物質總量便可得區塊內物質平均濃度和溫度的變化，譬如 CONTAM、COMIS 模式(Feustel, 1999; Dascalaki et al., 1999; Ren and Stewart, 2003)。其優點為計算簡單，但缺點為無法得知各個區塊內的風場和濃度、溫度的分佈。

多區塊模式常用孔口方程式(Orifice equation)來計算受風力驅動，通過建築物開口的通風量 Q ：

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中 A 為開口的截面積， ΔP 是室內外之壓力差， ρ 是空氣密度， C_d 是流量係數(Discharge coefficient)，流量係數範圍介於 0.60 ~ 0.65。此式是利用伯努利方程式在無黏滯性和不可壓縮流的條件下所導出的公式。此式應用於通風量計算時有幾個問題，室外壓力與風向、建築物外型、周遭建物有關，而室內壓力與室內隔間有關，不易求得。

Chu et al. (2009)利用孔口方程式和連續方程式導出一個可以預測風力驅動的貫流通風模式：

$$Q = U_H \cdot A \cdot C_d \sqrt{(C_{p1} - C_{p2}) \frac{A_{21}^2}{1 + A_{21}^2}} \quad (2)$$

式中 U_H 是建築物高度處的風速， A 是開口處面積， C_d 為流量係數， C_{p1} 和 C_{p2} 分別為迎風面和背風面的壓力係數。壓力係數定義為：

$$C_p = \frac{P - P_o}{0.5\rho U_H^2} \quad (3)$$

式中 P_o 為參考壓力， U_H 為建築物高度的風速。 A_{21} 為前後開口面積比，定義為：

$$A_{21} = \frac{A_2}{A_1} \quad (4)$$

式中 A_1 和 A_2 為前後開口面積。

朱佳仁 等 (2011) 發展了一個適用於台灣氣候條件的風壓通風計算模式 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。台灣的建築師可利用 TAIVENT 模式找出最能配合當地氣候條件的建築通風設計，充分地利用自然通風來維持舒適的室內環境。

(2) 全域模式(Field model)：又稱為計算流體動力學模式(CFD model)，先將室內空間格網化，依據連續方程式、那維爾-史托克方程式和擴散方程式，採用數值方法計算各個格網點上的風速和濃度。其優點為可以計算出流場的細部變化，但缺點為模式較為複雜，且計算量龐大(Chen, 2010)。

以下針對近年來關於建築物通風重要的研究文獻做一個回顧，其研究方法可分為：(1)計算流體動力學；(2)風洞實驗；(3)實場監測三種方式(Chen, 2008)，

茲分述如下：

(1)計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)：

近年來，紊流模式已成功地應用於建築通風問題。此種應用計算流體動力學於風工程的方式又稱為計算風工程(Computational Wind Engineering)或數值風洞(Numerical Wind Tunnel)。因為數值模擬所需經費較低，因此廣泛應用於各種工程問題。然而，Tominaga et al. (2008) 建議建築物風場模擬必須遵守的基本要求，這些要求包括計算網格、計算域、邊界條件、數值方法、收斂準則和 CFD 模型驗證。其中，基於風洞實驗的相關研究，其計算域的大小阻塞比應小於 3%。對於網格的設定，靠近建築物的網格應小於建築物高度的十分之一，才能準確計算在建築物周遭的紊流流場。本研究亦利用 Tominaga et al. (2008)的建議設定相關數值模式參數，以數值方法求解流場控制方程式的數值解，配合上適當的邊界和初始條件，且計算結果須與相同流況之實驗數據比對以驗證其正確性。

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

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{D\overline{U_i}}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \nu_T \nabla^2 \overline{U_i} \\ \frac{Dk}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{c_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_T \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} - \varepsilon \\ \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{c_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_T \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

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

$k - \varepsilon$ 模式雖可用於計算非均質性(Inhomogeneous)紊流，但不適用於非等向性(Non-isotropic)紊流。譬如十分靠近邊壁處，垂直於邊壁之紊流速度受到抑制而變小，水平向的紊流速度則不受影響，屬於非等向性紊流。故在計算邊界層流時，邊壁處需使用邊牆函數(Wall function)。 $k - \varepsilon$ 模式的缺點為：此模式假設動能消散率 ε 與大尺度渦流有關，而與最小渦流無關，但這假設與紊流能量消散的理論並不相符。此外，使用數值模式計算建築物周遭風場必須注意所使用的紊流模式、計算格網(Computational grid)及模式參數，方能得到正確的計算結果(Tominaga et al., 2008)。且建築物開口處往往有紗窗、百葉窗等，計算模式若不能準確地模擬其阻滯氣流的效應，則計算結果將無法應用於實際的室內風場。

第三節 研究文獻

以下針對近幾年來與建築物通風有關的研究文獻做一個回顧，以瞭解國內外最新的通風研究：

周伯丞 (2000)針對台灣地區的氣候環境，運用標準 $k - \varepsilon$ 紊流模式與低雷諾數 $k - \varepsilon$ 模式計算室內風場，配合全尺寸之環境實驗室的實測數據，針對室內換氣量進行驗證比對。其研究結果顯示：標準 $k - \varepsilon$ 模式所需要的計算時間較短。而台灣地區的春、秋季適合自然通風，可利用門窗之間的風壓差異，形成貫流通風，維持室內舒適性。且風壓通風之效果隨著室外風速增大而漸增。但在冬季時期，因在夜間睡眠時段常緊閉門窗以保持室內溫暖，不利於自然通風。

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

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

邱瓊萱 (2004)利用計算流體動力學(CFD)數值模式模擬垂直通風管對自然通風的影響，數值模式選用標準 $k-\varepsilon$ 紊流模式計算穩態風場下的室內通風路徑及換氣率，用以評估各種通風管管頂形式對於室內通風的實質效益。作者認為在低層建築或換氣較差之單側通風居室，在裝設通風管後可有效提昇室內換氣率 3.6~4.8 倍，但此結果並未經由實驗數據驗證。

Evola and Popov (2006)利用標準 $k-\varepsilon$ 模式和重整化群(Renormalization Group, RNG) $k-\varepsilon$ 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 $k-\varepsilon$ 紊流模式的計算結果誤差較大，重整化群(RNG)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。在室外有風且室外風速小於 1.5~2.0 m/s 時，會形成風壓與浮力換氣路徑相反的現象，削弱室內浮力通風的效果；當室外風速達到 2.0 m/s 時，風壓通風會大於浮力通風，中庭內的通風路徑則由風壓通風主導。

Chang (2006)和張瑋如 (2006)利用二維 $k-\varepsilon$ 紊流模式探討室外植栽風擋對於兩層樓建築物貫流通風的影響，研究結果發現植栽孔隙率小於等於 0.1 時，背風面壓力係數會高於迎風面的壓力係數。因此，孔隙率過低時會產生逆向通風的現象，造成循環氣流或停滯氣流、通風不佳的效果。靠近建築物設置植栽對二樓不但沒有遮蔽效應，反而在植栽的孔隙率較大時，會產生比原本更強勁的風速，故圍籬應避免太靠近建築物。因此，建築設計師選擇植栽風擋必須慎選之。

Bauman et al. (1998)用風洞實驗量測兩排相鄰低層建築物和不同屋頂開口

其壓力分佈。他們的研究結果表明，當建築物間距小於 1 倍建築物高度，會出現相鄰建築物的遮蔽效應，導致降低風速和風力驅動的通風量。

Chang and Meroney (2003) 用風洞試驗和 $k - \varepsilon$ 模式研究低層建築環境的影響建築物的壓力分佈，其結果顯示當兩棟建築物的距離為一半建築物高度時，主建築物的風壓係數會減少 80% 以上。這篇文章還採用 Oke (1998) 對流況的分類，當建築物間距 $S/H > 5.0$ 時 (H 為建築物高度)，流況為獨立流 (independent flow)，上風建築物的尾流場不會影響下風建築物；當建築物間距 $S/H < 1.2$ 時，流況為掠過流 (skimming flow)，氣流直接由建築物上方掠過，建築物之間的風速小；當建築物的間距 $S/H = 1.2 \sim 5.0$ 時，流況為尾跡干擾流 (wake interference flow)，上風建築物的尾流場會影響下風建築物周遭的流場。

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

陳念祖 (2007) 以單側及側向開口模式為探討對象，針對開口裝設水平及垂直導風板對自然通風效益之影響。研究方法運用計算流體力學 (CFD) 數值模擬方式進行，配合全尺模型實驗檢證數值模式之可信度，研究結果顯示：(1) 單側開口裝設水平導風板模式時，9 cm 以上水平導風板有助於提升單側通風時之換氣率，並隨導風板深度而遞增，尤其當外部風速小的時候較為明顯，若綜合考量各評估項目，導風板深度以 18~48 cm 為較佳的選擇。(2) 側向開口裝設垂直導風板模式，在外部風速 (0.5~2.0 m/s) 條件下，當風向平行於建築物開口時，裝設垂直導風板之平均換氣次數約可較無導風板者增加 260%，其中以導風板角度 45° 較佳。當風向與建築立面成 45° 時，導風板角度 $0^\circ \sim 22.5^\circ$ 有利於室內流場均勻。綜合評估後，依照不同風向提出最佳化的垂直導風板角度調變模式。

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

Kim et al. (2010) 用於風洞試驗和標準 $k-\varepsilon$ 模式模擬探討封閉式商場的通氣性能。模擬的結果主要來分析四種不同屋頂開口和屋頂高度的通風量。他們的研究結果表明，當市場屋頂高度從 4.5 m 提高到 6.5 m 時市場內的空氣交換率會增加 35% 左右。

吳玉婷(2010)以成功大學的綠色魔法學校為案例，利用 $k-\varepsilon$ 模式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，太陽能煙囪在春秋兩季適用性較夏季高，當春秋兩季室外氣溫 26°C 時，其室內溫度介於 $26\sim 27.2^{\circ}\text{C}$ ，自然通風可產生室內風速 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ ，約可降溫 $0.5\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ ，符合春秋兩季 90% 群眾可接受之溫度 $23.5\sim 28.5^{\circ}\text{C}$ ，而夏季室外氣溫 30°C 時，室內溫度則只符合 80% 群眾可接受之溫度。該研究亦發現室外風速可增加通風效益，在相同之室內發散熱設定下，室外有風比無風狀態的通風量增加約 13.4~22.2%，其中以春秋兩季下午增加最多，夏季上午增加最少。

(2) 風洞實驗：

風洞實驗室內之儀器設備，因為控制性佳，可重複性高，且量測之數據可供數值驗證之用。因此可以在實驗室內，針對特定的風場現象，就其中重要的參數進行一系列的實驗，來探討這些參數如何影響風場及其內在的機制。譬如 Ohba et al. (2001)利用裂膜(Split film)探針量測前後皆有開口之建築物模型的室

內風場。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 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 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 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之間，則流量係數 $C_d = 0.7$ 幾乎不變。

Kurabuchi et al. (2004)提出一個局部動力相似(Local dynamic similarity)理論，認為開口的流量係數與風向角、開口位置、開口附近是否有建築物的情形皆無關，僅與無因次壓力 P_R^* 有關：

$$P_R^* = \frac{P_R - P_W}{P_t}$$

式中 P_R 為室內壓力， P_W 為風壓， P_t 為正切於開口處的動壓力。此相似理論並經由風洞實驗和大渦流模式(Large Eddy Simulation, LES)的驗證。亦即在任何風向角度和開口位置，皆可由無因次壓力 P_R^* 準確的預測出流量係數。

Chiu and Etheridge (2007)利用風洞實驗探討外部風場對銳緣開口(Sharp-edged opening)和長開口(Long opening)之流量係數的影響，發現流量係數會隨風向角而變。作者並利用計算流體動力學(CFD)分析不同流場對開口流量係數的影響。其研究結果顯示：前人的研究之流量係數都是在穩態風場的狀態下所訂定的，並不適用於各種流況下的通風量計算。利用在穩態的氣流狀態下求出的流量係數計算非穩態風場中的自然通風容易有錯誤。

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

流體動力學(CFD)模式便可預測各種狀況下建築物的通風量。

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

Chu et al. (2010) 採用理論分析及風洞模型實驗的方式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 and Wang (2010) 利用流體能量守恆的觀念和連續方程式發展一個阻抗模式來計算有室內隔間及有障礙物時的貫流通風量：

$$\frac{Q}{U_0} = \left[\frac{C_{p1} - C_{p2}}{\zeta_1 + \zeta_i + \zeta_2} \right]^{1/2}$$

式中 C_{p1} 、 C_{p2} 分別為迎風面、背風面的風壓係數， U_0 為室外風速， ζ_i 為室內阻抗因子(Resistance factor)，單位為 $[m^{-4}]$ 。並藉由風洞模型實驗的數據驗證了此阻抗模式，此模式可供建築設計者未來在評估、規劃建築物自然通風之用。

Chu et al. (2011) 利用風洞實驗與示蹤劑(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，開口處的風剪力會驅使室內外空氣交換，室外風速愈大，風剪力愈強，換氣率愈大。在此風向下，雙側開口的換氣率為單側開口換氣率的五倍。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。

(3) 實場監測：

實場調查為瞭解實際風場最直接的方式，且實場量測來獲得實驗資料是最具說服力。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. (2009)利用示蹤劑法研究在機械通風的狀況下，去除廁所內臭味的最佳進風口、出風口之位置。但實場量測所需的人力、經費和時間較多。且實際風場與時俱變，而會影響風建築物通風的因素太多、太複雜，往往不易由監測結果深入瞭解通風現象背後的機制。

綜觀以上的研究可知，前人研究大多探討不考慮受周遭建築物影響下的自然通風，本研究採用風洞實驗與紊流數值模擬的方式研究集合式住宅受周遭建築物影響下的自然風壓通風，如圖 2-3 所示。研究的參數包括室外風場、建築物之間的間距、高度、寬度等。研究成果分析整理之後，將建立一個可預測相鄰建築物造成的遮蔽效果對風壓通風的影響之預測模式，讓建築設計者評估室外障礙物對建築物通風量影響的程度，以期望能改進建築設計、室內通風環境，達到綠建築之節能、健康的設計理念。

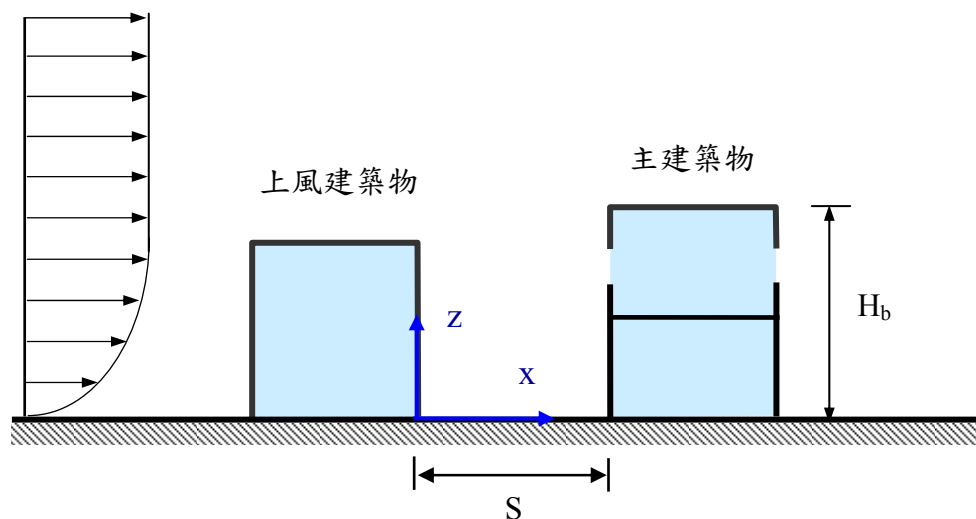


圖 2-3 受鄰近建築物影響之主建築物示意圖

資料來源：本研究整理

第三章 風洞實驗

第一節 儀器設備

風洞實驗是在內政部建築研究所風雨風洞實驗室的大型風洞進行建築物風壓通風實驗，該風洞是一個封閉迴路式風洞(如圖 3-1)，總長度為 77.9 m，高度為 15.9 m，最大寬度為 9.12 m。該風洞具有兩個測試區，第一測試區長 36.5 m，斷面為 4.0 m × 3.0 m；第二測試區長 21 m，斷面為 6.0 m × 2.6 m。本研究之模型實驗是在第一測試區中進行，最大風速可達 30 m/s，空風洞時風洞內紊流強度 0.17~2.0% (葉祥海、苗君易，2004)。

建築物模型以壓克力板製作，模型外部尺寸為高度 $H = 60$ cm，長度 $D = 30$ cm，寬度 $B = 30$ cm，模型縮尺比為 1:100。模型表面為厚度 0.25 cm 的光滑壓克力板，建築物模型表面沒有開口(sealed model)。圖 3-2 建築物模型的照片。模型的正面有 55 個壓力量測孔。壓力量測孔上下、左右的間距皆為 5 cm，壓力量測孔直徑 0.1 cm。壓力量測孔連接內徑 0.1 cm，長度 40~60 cm 之 PVC 管線至壓力感應器，即可量測模型表面的壓力。

模型表面風壓係以建築研究所風洞實驗室的多頻道電子式壓力掃瞄器(ZOC33/64 PX, Scanivalve)配合壓力訊號處理系統(RAD BASE 3200)同步量測建築物表面各點的瞬時壓力(如圖 3-3)。壓力傳感器測量範圍為 ± 2758 Pa，誤差 ± 2.2 Pa。該壓力掃瞄器每個模組有 64 個壓力輸入管(pneumatic inputs)，對應 64 個壓電式壓力感應器，64 個壓力感應器共用一個參考壓力(Reference)，但每個壓力感應器皆可單獨校正。氣流輸入管是由內徑 0.1 cm PVC 管連接至模型量測點以量測模型表面壓力。壓力量測系統可支援類比數位之轉換，本研究所使用量測系統最高可支援 8 個模組，其解析度達 16 bits，最大取樣頻率為 500 Hz，擷取之資料轉換完成後可藉由 USB 傳輸系統傳至個人電腦儲存分析。本研究進行風洞實驗時，將壓力模組放入建築物模型內部，壓力管線連接至壓力模組上的壓力輸入埠，模型每一個表面分別規劃為同一壓力模組，一次使用 1 個壓力模組，再接入電子式壓力掃瞄器。

除此之外，本研究亦利用中央大學的風洞進行風洞實驗，該風洞為開放式

風洞，總長度為 30 m，試驗段為長 18.5 m，寬 3.0 m，高 2.1 m。矩形模型的尺寸高度為 0.60 m、寬度為 0.30 m、長度為 0.30 m。模型在風洞的阻塞比為 2.86%。模型表面風壓係以風洞實驗室的多頻道電子式壓力掃描器配合壓力訊號處理系統同步量測建築物表面各點的瞬時壓力。採樣頻率為 100 Hz，採樣時間為 163.84 秒。壓力傳感器等組件放置建築物模型中確保測量時不受影響。而風洞內參考風速則是利用皮托管(如圖 3-4)量測。實驗中參考壓力 P_0 和風速 U_0 分別為距離風洞地板底部 60 cm 處之皮托管靜壓和風速。

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

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

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

$$C_p = \frac{\bar{P} - P_0}{0.5 \rho U_H^2}$$

式中 ρ 為空氣密度， P_0 為參考壓力， U_H 為建築物屋頂高度處($z = 0.60$ m)的時間平均風速。

本實驗將模型分別放置於風洞的轉盤中心，轉盤前方設置粗糙元(roughness element)，使得邊界層加速發展。實驗時，建築物模型正前方設置一個相同尺寸的建築物模型，圖 3-5 所示，研究受到周遭建築物影響下的風壓通風。實驗中測量紊流流速的儀器是熱速流線儀(IFA300, TSI Inc.)和一維熱膜探針(1210-20, TSI Inc.)。採樣頻率為 600 Hz，採樣時間為 27.31 sec。其量測得之平均風速剖面 $U(z)$ 與紊流強度剖面顯示於圖 3-6，其邊界層厚度為 150 cm。平均風速剖面利用指數律(power law)計算：

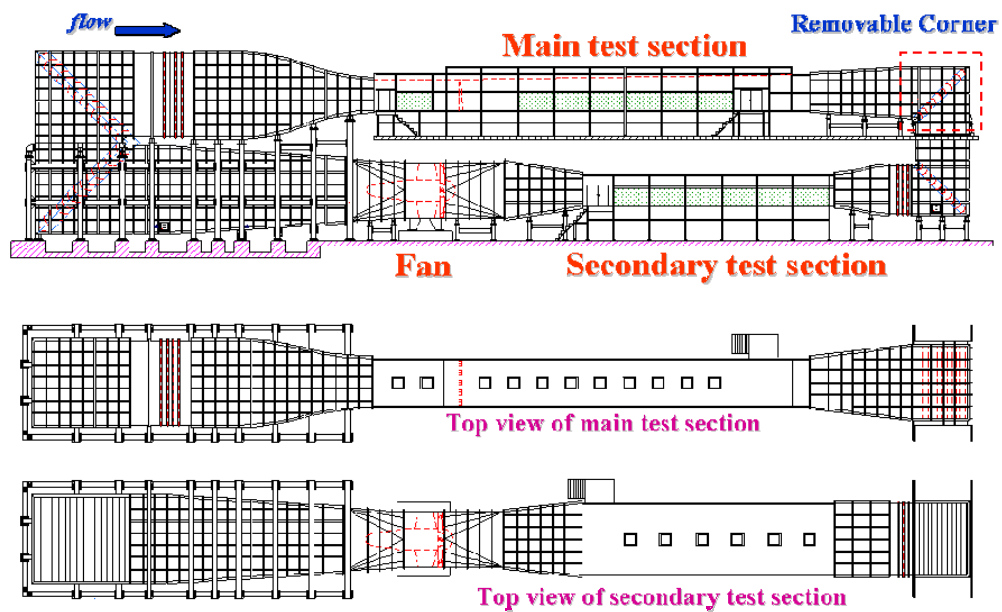


圖 3-1 建築研究所風洞實驗室配置圖

資料來源：內政部建築研究所提供



圖 3-2 建築物模型置於風洞內之照片圖

資料來源：本研究整理

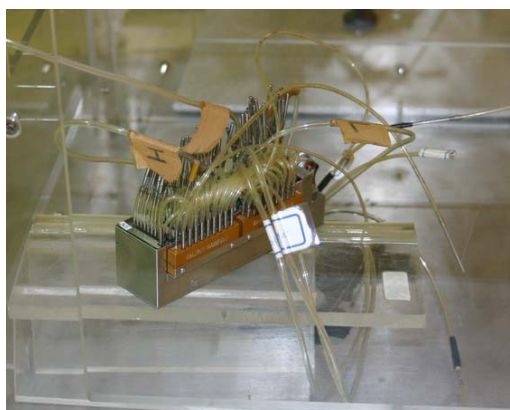


圖 3-3 壓力掃描器

資料來源：本研究整理



圖 3-4 皮托管

資料來源：內政部建築研究所提供

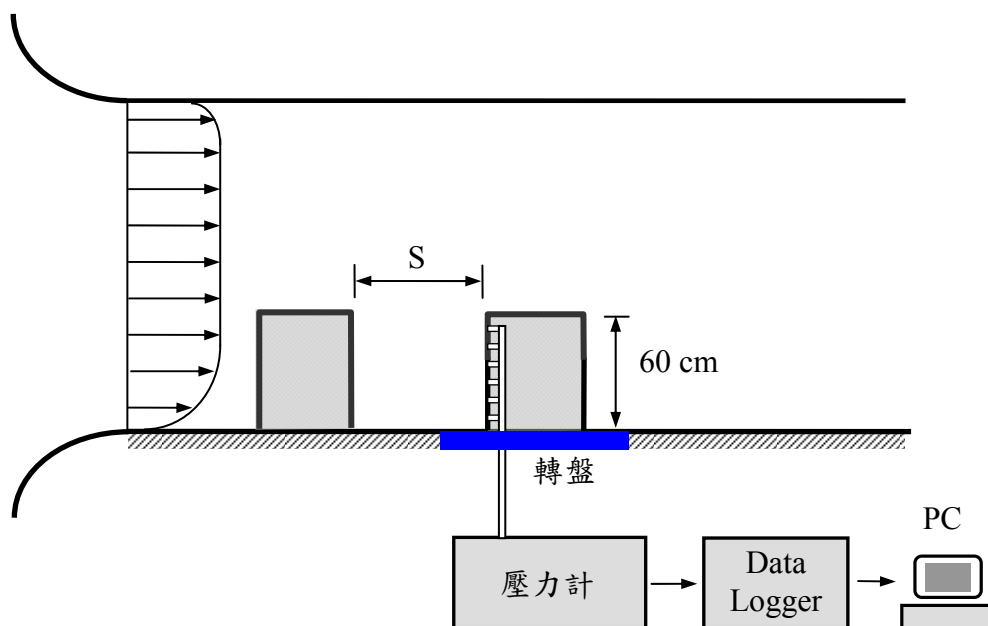


圖 3-5 風壓實驗配置之示意圖

資料來源：本研究整理

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

式中 U_o 為自由流風速， δ 為邊界層厚度， α 為指數常數。本研究中採用 $\delta = 1.5 \text{ m}$ ， $\alpha = 0.2$ 。自由流風速 $U_o = 12 \text{ m/s}$ ，建築物高處風速 $U_H = 10 \text{ m/s}$ 。紊流強度的定義為：

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)}$$

式中 σ_u 為 x 方向紊流流速 u 的均方根值(standard deviation)。紊流強度剖面圖顯示於圖 3-6。結果透過迴歸分析求得出紊流強度分佈為：

$$I_u(z) = 0.22756 \times \exp(-1.137 \frac{z}{\delta})$$

式中 z 為地面上的高度(m)。利用建築物模型的高度及該處的風速計算雷諾數 $Re = U_H H / \nu = 4 \times 10^5$ 。

本風洞實驗的目的為研究受到前方建築物影響狀況下，下風建築物表面的時間平均壓力係數。風向角為風向與建築物表面夾角，風向角 $\theta = 0^\circ$ ，表示風向垂直於建築物迎風面。因模型為左右對稱，實驗僅量測迎風面及背風面的表面壓力。

第二節 實驗結果

本研究在紊流邊界層流中，改變前後棟矩形建築物模型之間的距離 S ，探討鄰近建築物對主建築物表面風壓及風壓通風的影響。間距 $S = 0.3 \text{ m}$ ， 0.6 m ， 0.9 m ， 1.2 m ， 1.5 m 及 1.8 m ，圖 3-7 顯示量測得之建築物迎風面中心線($y/W = 0$)的迎風面及背風面中心線之時間平均風壓係數 C_p 分佈圖， $S^* = S/H_b$ 為無因次間距。圖中顯示建築物迎風面上半部建築物模型的風壓係數受到上風建築物的影響，迎風面的風壓係數小於單棟建築物的風壓係數，但前後間距大於等於四倍建築物高度時，遮蔽效應的影響變小。背風面的風壓係數亦十分類似。將迎、背風面的風壓係數代入貫流通風模式可計算風力驅動之通風量，圖 3-8 顯示貫流通風量之垂向分佈圖及通風量與前後棟間距 S^* 的關係。

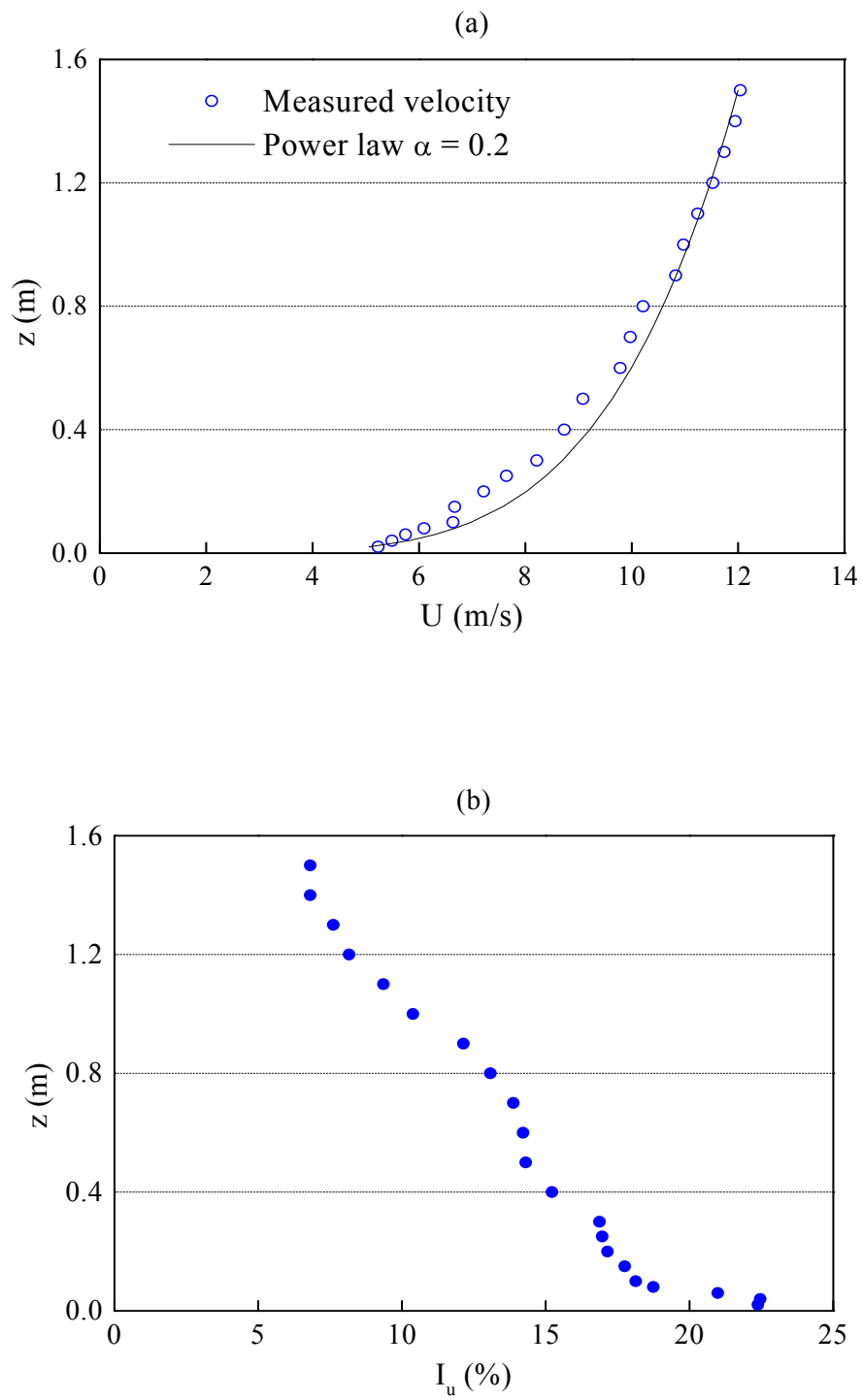


圖 3-6 建築物前方來流之風速垂向分佈圖(a)平均風速; (b)紊流強度

資料來源：本研究整理

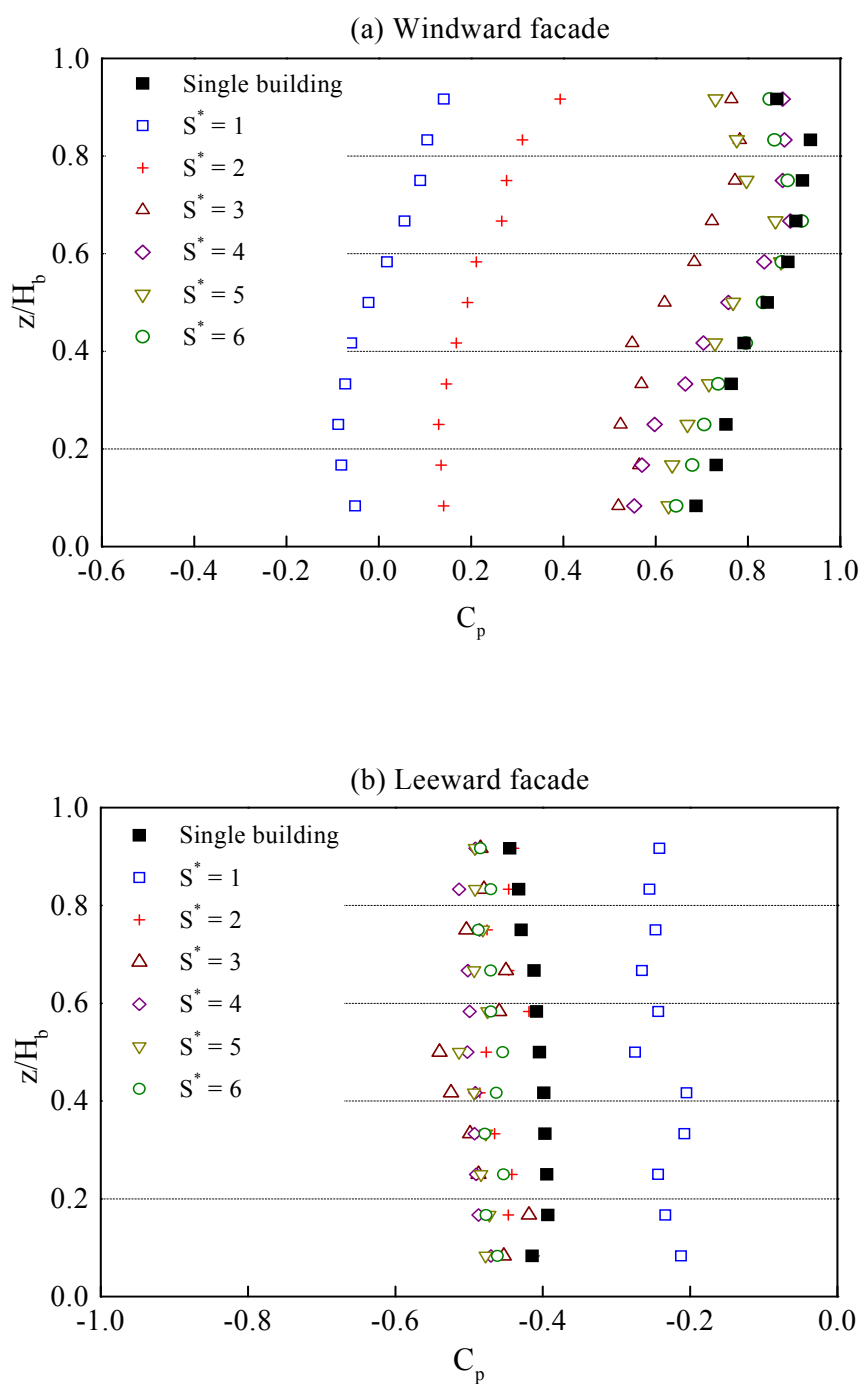


圖 3-7. 建築物模型表面中心線之風壓係數分佈圖(a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

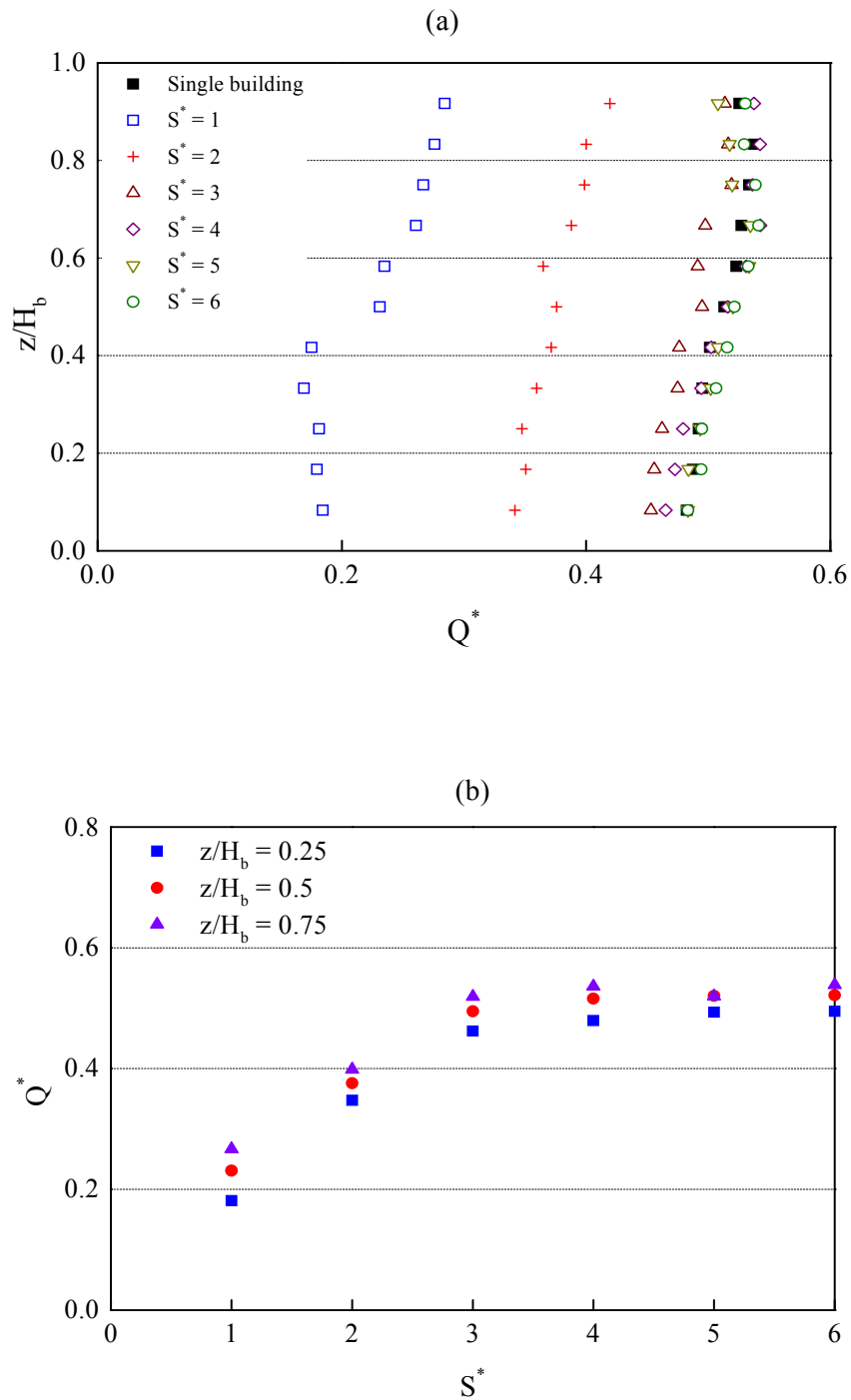


圖 3-8. 建築物無因次貫流通風量(a)通風量之垂向分佈圖；(b) 通風量與前後棟間距關係圖

資料來源：本研究整理

本研究利用內政部建築研究所風洞實驗室的壓力掃描計量測在紊流邊界層流中， Γ 型與 L 型建築物模型，在不同的風向角 θ 狀況下，建築物表面風壓的分佈情形。圖 3-9 及 3-10 為建築物模型之尺寸示意圖，圖 3-11 模型之上視圖標示模型各個表面，圖 3-12 為建築物模型放置於風洞內之照片。圖 3-13 比較風向角 0 度時，L 型與矩形建築物模型迎風面及背風面之時間平均風壓係數 C_p ，圖 3-14 比較 Γ 型與矩形建築物在風向角 0 度下，迎風面及背風面中心線之平均風壓係數 C_p 。實驗結果顯示 Γ 型與 L 型建築物的背風面風壓皆小於矩形建築物背風面之風壓，建築物的表面風壓會隨建築物的幾何外型不同而有所不同。圖 3-15 ~ 3-20 為量測得之建築物各表面中心線的風壓係數 C_p 分佈圖，圖中顯示建築的表面風壓會隨建築物的幾何外型不同而有所不同。圖 3-21 為風向角 0 度，L 型模型 B 面風壓係數分佈，圖左端為上游，右端為下游，風壓係數由上游往下游遞增。圖 3-22 為風向角 0 度， Γ 型模型 I 面風壓係數分佈，圖右端為上游，左端為下游。

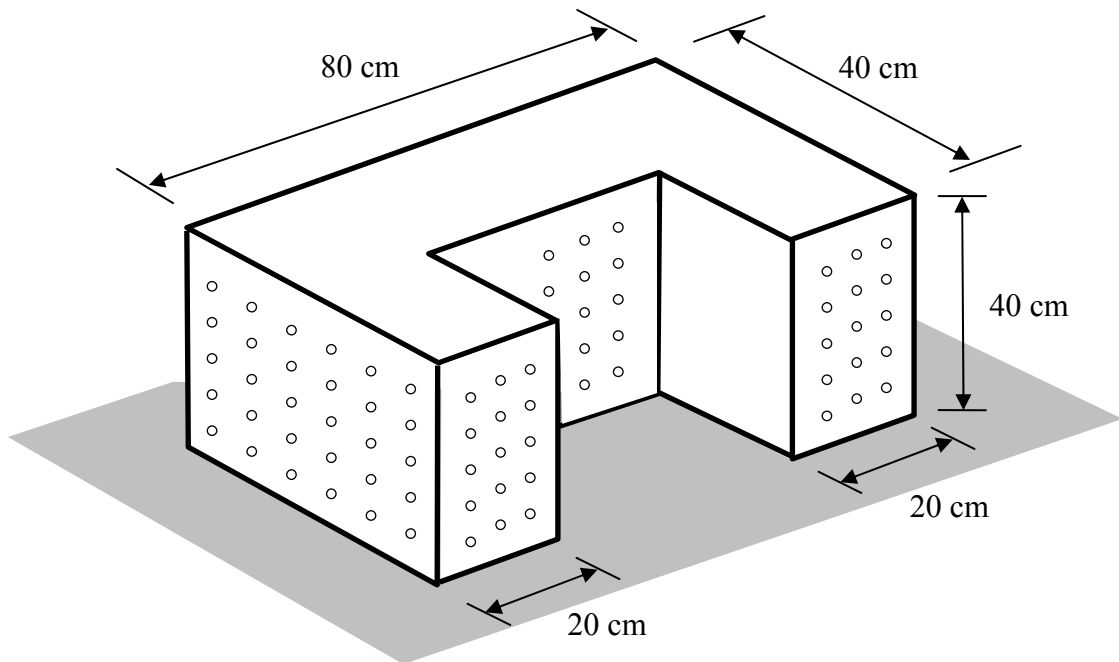


圖 3-9 Γ 型建築物模型示意圖

資料來源：本研究整理

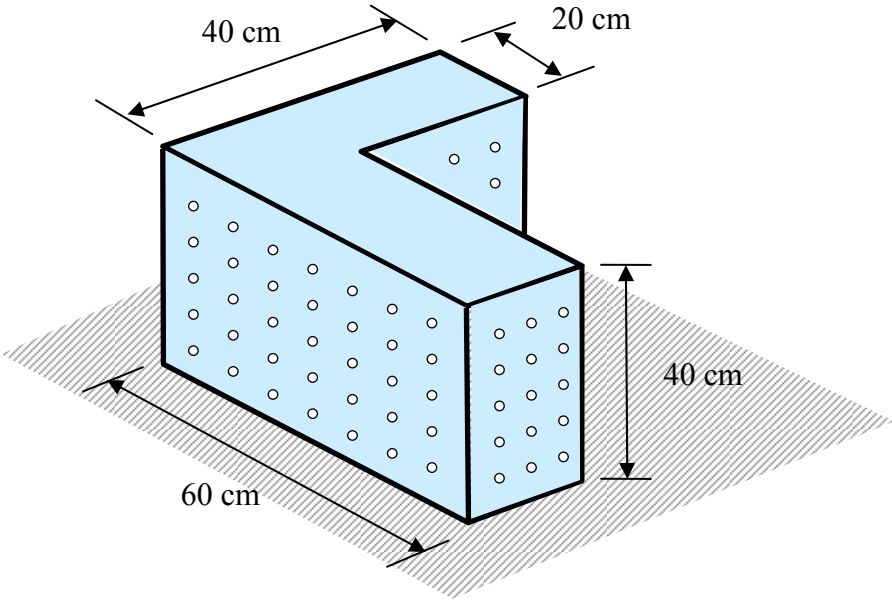


圖 3-10 L 型建築物模型示意圖

資料來源：本研究整理

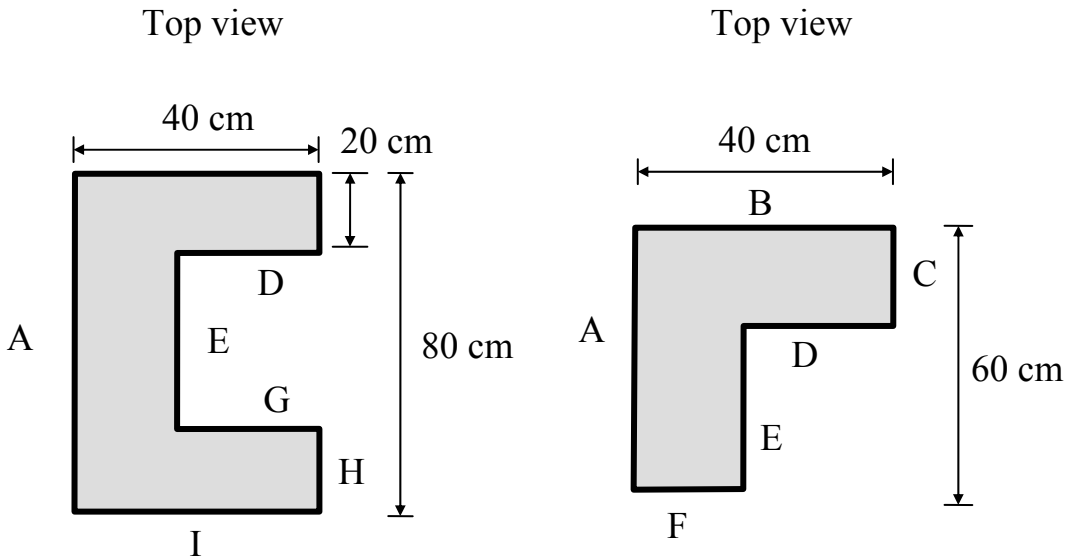


圖 3-11 門型建築物與 L 型建築物模型之上視圖

資料來源：本研究整理

(a)



(b)



圖 3-12 建築物模型置於風洞內之照片圖(a)冂型建築物模型(b)L 型建築物模型

資料來源：本研究整理

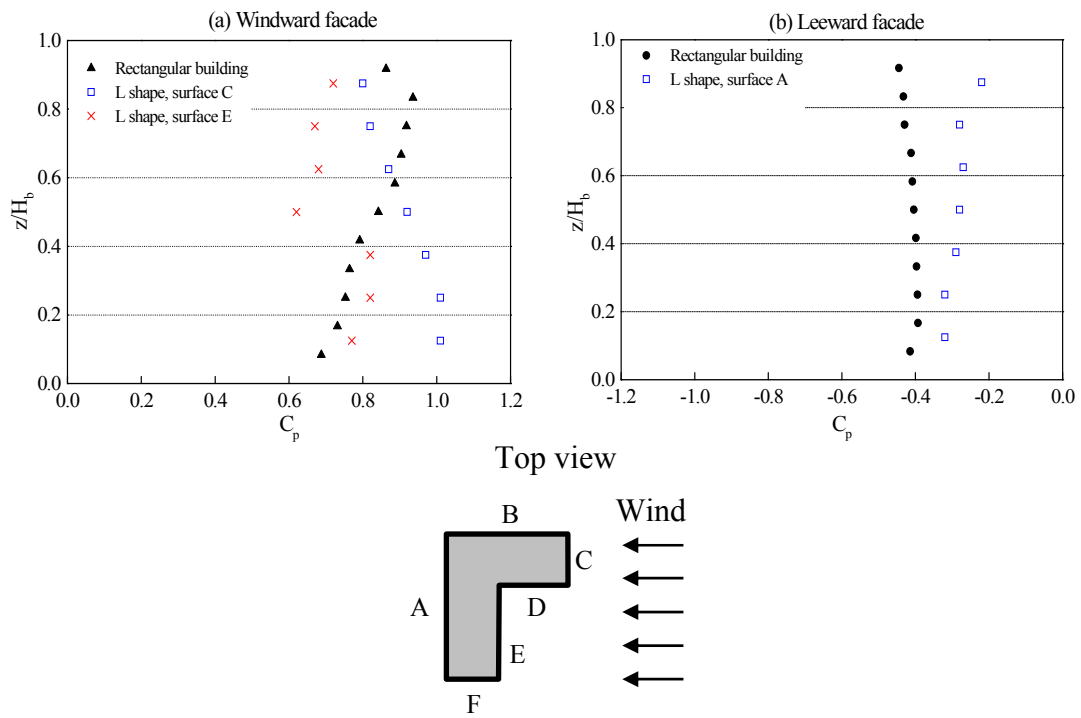


圖 3-13 風向角 0 度，L 型模型風壓係數之比較

資料來源：本研究整理

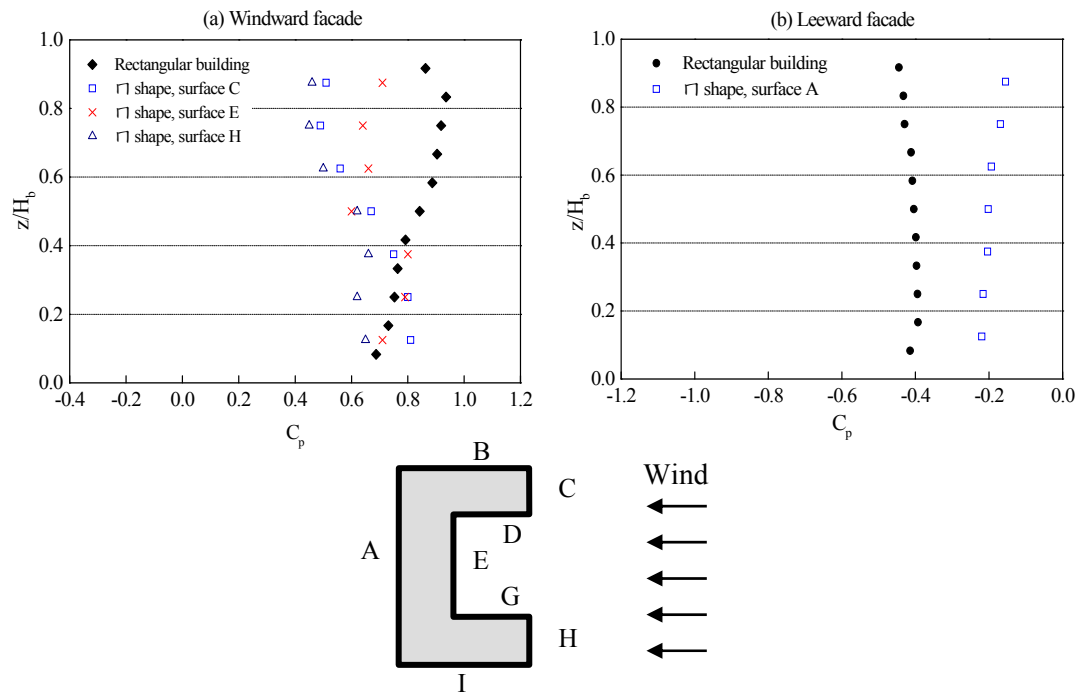


圖 3-14 風向角 0 度，U 型模型風壓係數之比較

資料來源：本研究整理

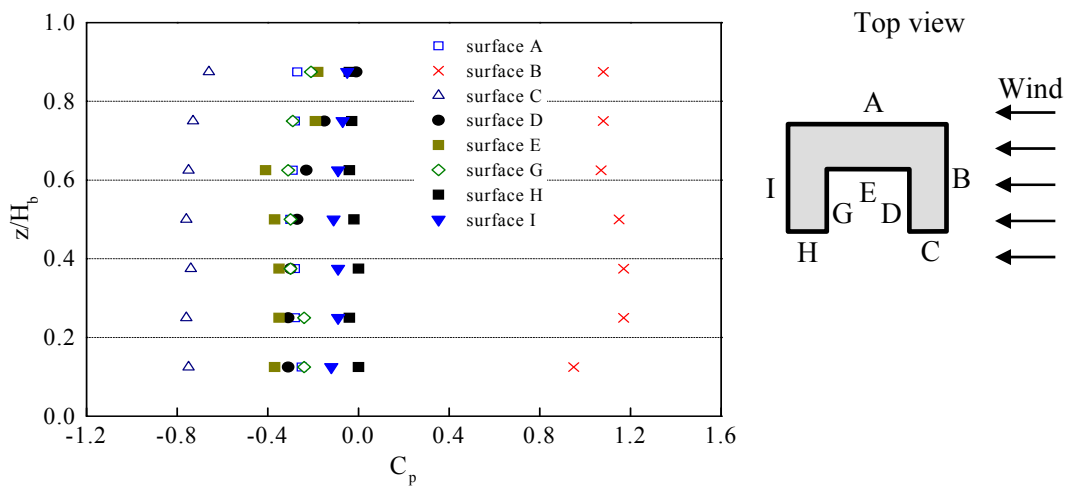


圖 3-19 風向角 90 度，U 型模型各表面中心線之風壓係數

資料來源：本研究整理

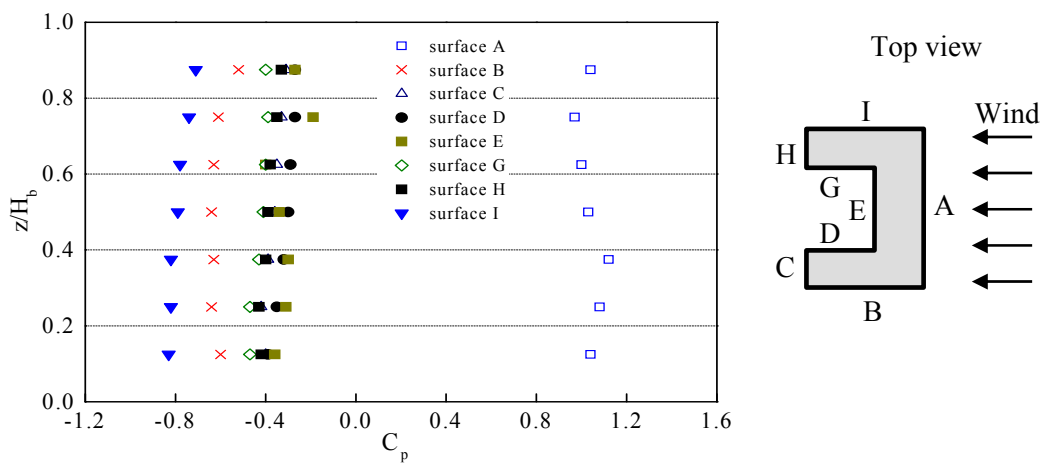


圖 3-20 風向角 180 度，U 型模型各表面中心線之風壓係數

資料來源：本研究整理

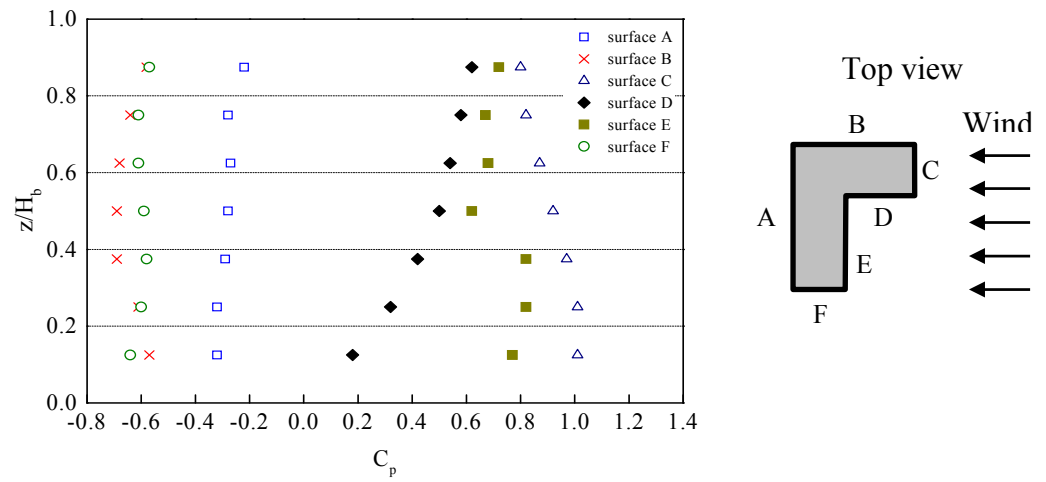


圖 3-15 風向角 0 度，L 型模型各表面中心線之風壓係數

資料來源：本研究整理

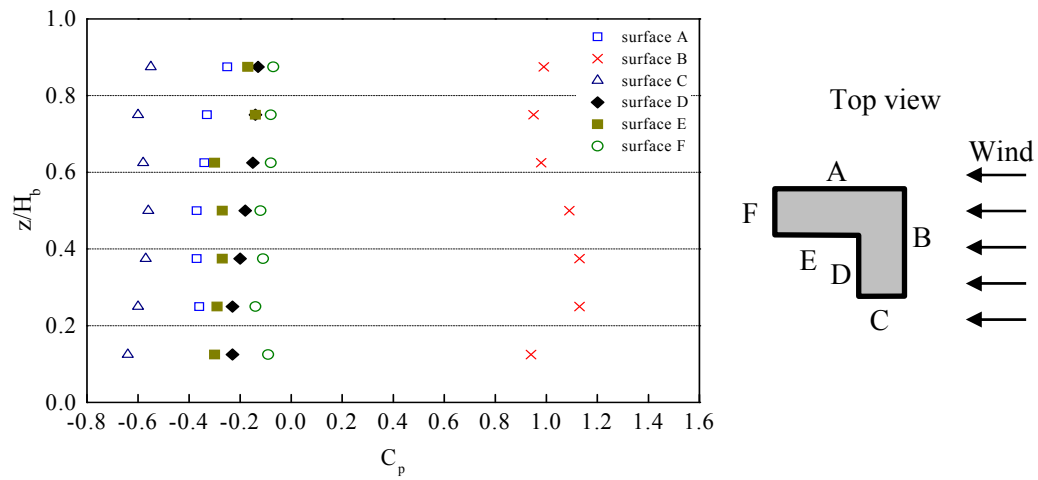


圖 3-16 風向角 90 度，L 型模型各表面中心線之風壓係數

資料來源：本研究整理

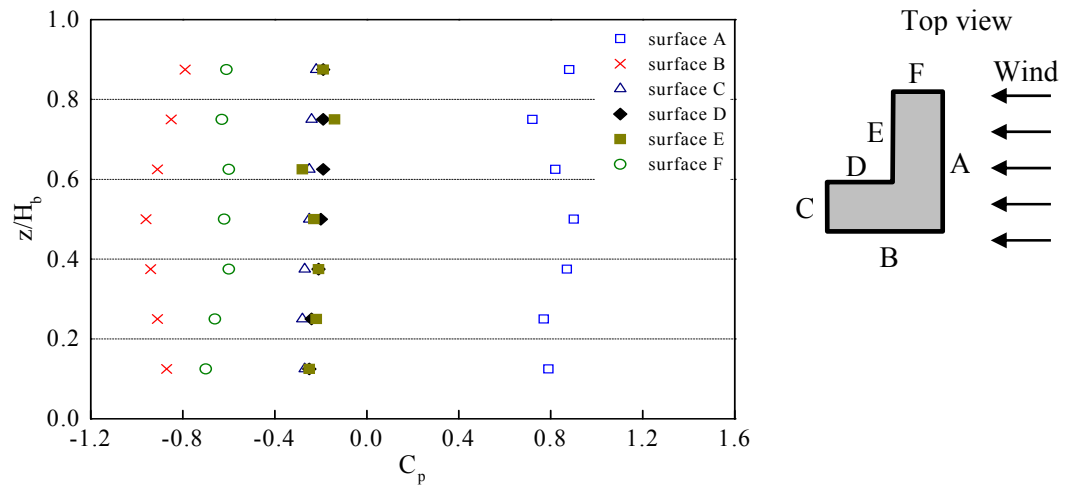


圖 3-17 風向角 180 度，L 型模型各表面中心線之風壓係數

資料來源：本研究整理

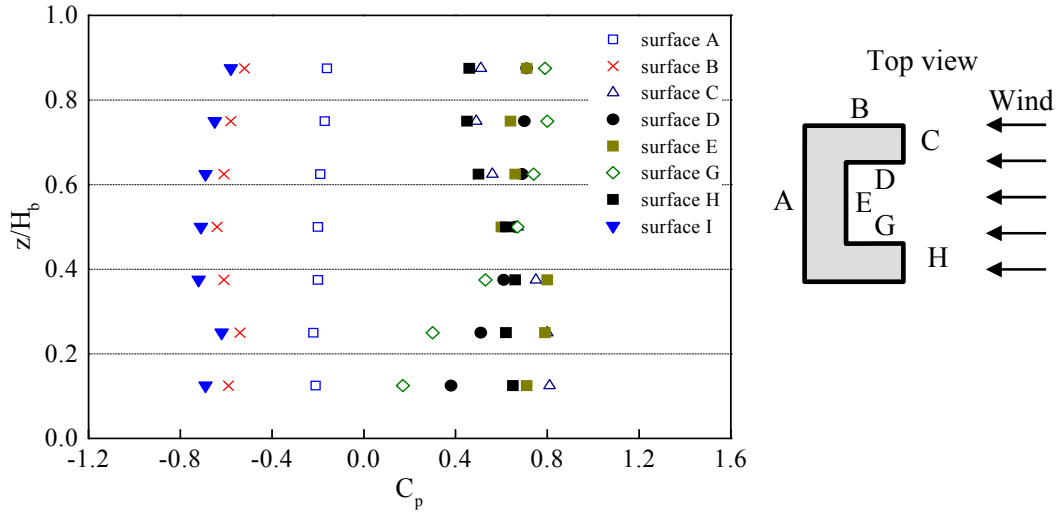


圖 3-18 風向角 0 度，U 型模型各表面中心線之風壓係數

資料來源：本研究整理

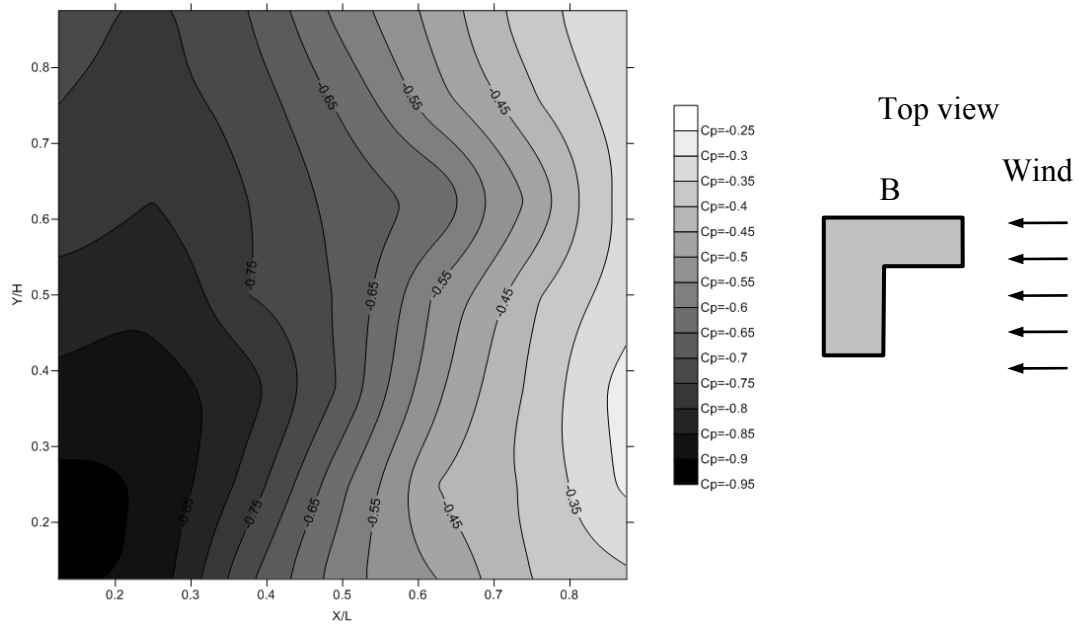


圖 3-21 風向角 0 度，L 型模型 B 面風壓係數分佈圖

資料來源：本研究整理

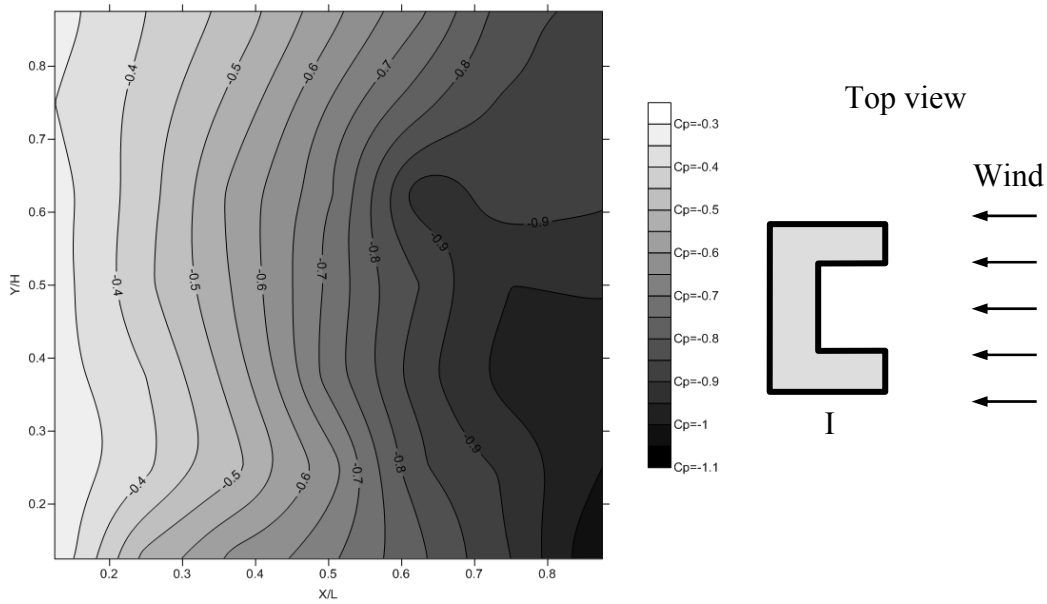


圖 3-22 風向角 0 度，U 型模型 I 面風壓係數分佈圖

資料來源：本研究整理

第四章 數值模式

第一節 模式介紹

本研究亦採用三維計算流體動力學模式的大渦模擬 (Large Eddy Simulation, LES) 模式計算建築物周圍的流場和壓力分佈。模擬流體運動是通過求解連續方程式和 Navier-Stokes 方程式。控制方程式可以表示為：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中下標 $i, j = 1, 2, 3$ 分別代表 x, y, z 三個方向， t 為時間， $\bar{u}$ 和 $\bar{P}$ 為濾波後的速度和壓力， ρ 為空氣密度，其 τ_{ij} 代表次網格剪應力(subgrid scale stresses)：

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} - 2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

上式中 μ_t 是次網格紊流黏滯係數，定義為：

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta_s)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (4)$$

式中 C_s 為 Smagorinsky 常數， $\bar{S}_{ij}$ 為應變率(rate of strain)：

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中 Δ_s 是次網格混合長度，可以計算為：

$$\Delta_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (6)$$

式中 $\kappa (= 0.41)$ 為馮卡門常數(von Karman constant)， d 為靠近牆的距離， V 為計算網格的體積。Smagorinsky 模式參數會依據不同類型之流場而有不同值，其值變化範圍 0.1 至 0.3，本研究採用 $C_s = 0.15$ 。當 Δ_s 趨近無限小時， μ_t 將趨近於零，因此式(2)變成原本的那維爾-史托克(Navier-Stokes)方程式，故大渦流模擬之網格加密小於最小之渦流時，大渦流模擬之結果將趨近於直接數值模擬(Direct Numerical Simulation, DNS)法之結果。因此網格很小時，DNS 和 LES 模式之數

值模擬結果將趨近一致，但網格較粗時，LES 之模擬較為省時，也能夠呈現雷諾平均模式(RANS)所無法解析之渦流效應。

由於在接近固體邊界處，紊流會由於邊壁效應而減弱，故需使用邊牆函數(wall function)來計算靠近建築物的流速，其邊牆函數定義為：

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[E \left(\frac{\rho u_* z}{\mu} \right) \right] \quad (7)$$

式中 u_* 為剪力速度(shear velocity)， κ 為馮卡門常數， $E (= 9.793)$ 為常數， μ 為動力黏滯係數(dynamic viscosity)， z 為邊牆網格中心至邊牆距離。

本研究使用二階上風法(second order upwind)來計算動量方程式，用 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)求解壓力速度的耦合問題。此外計算時間步幅(Time step)必須遵守可蘭數(Courant number) $Cr = u\Delta t/\Delta x < 1.0$ 的限制以維持計算的穩定度，本研究將可蘭數設定為 0.45。

第二節 模式驗證

本研究使用商用軟體 Fluent 來進行模擬建築物周遭的流場，其網格的生成是用軟體 Gambit 設計，模式參數的設定遵守 Tominaga *et al.* (2008)的建議進行數值模擬。為了證明數值模擬的準確性，模擬結果與風洞實驗結果進行比較分析。圖 4-1 顯示在數值模擬計算域中放置兩個相同的比例建築物模型和計算域大小。其兩棟建築物的前後距離為 S 。對稱邊界條件（零剪應力）設定在計算域上邊界和兩個側邊界。出口邊界距離建築物有 15 倍建築物高度，邊界條件設定為壓力等於零。無滑移(No slip)邊界條件設定為建築物的牆壁和地板上。

圖 4-2 顯示數值模擬所使用的網格，本研究將計算域分為 3 個區域。因為在建築物周圍流場變化大，計算網格容易影響數值結果，因此在第 II 區靠近建築物的區域使用均勻的細網格($\Delta x/H_b = \Delta y/H_b = \Delta z/H_b = 0.033$)來計算。而在遠離建築物的地方，如第 I 區和第 III 區的網格逐漸變大(拉伸比 1.1)。在 x 方向，最大和最小的網格分別為 $\Delta x/H_b = 0.033$ 和 0.672。在 y 方向，最大和最小的網格分別為 $\Delta y/H_b = 0.033$ 和 0.333；在 z 方向的最大和最小的網格分別為 $\Delta z/H_b =$

0.033 和 0.309。

本研究先用 LES 模式計算單棟建築物表面的壓力和流場，並與實驗結果相比，然後再模擬兩棟相鄰建築物的流場與壓力係數。數值模擬中計算域設定為：長度 $L = 20.5H_b$ ，寬度 $W = 6.5H_b$ ，高度 $H = 6.0H_b$ 。該模型在計算域的阻塞比為 1.28%，無因次時間步為 $\Delta t^* = U_0 \Delta t / H_b = 2 \times 10^{-2}$ 。對於非穩定的 LES 模式，在入口邊界的紊流擾動速度使用頻譜法(spectral synthesizer method)。

圖 4-3 比較在單棟建築物的迎風面和背風面中心線($y = 0$)之實驗量測值和模擬的壓力係數。實驗結果顯示，在迎風面中心線的壓力係數 C_{p1} 介於 0.65 ~ 0.95 範圍內，而在背風面中心線的壓力係數 C_{p2} 介於 -0.38 ~ -0.45。然而，實驗和模擬的壓力係數最大的差別在靠近建築物迎風面底部的區域，差異約為 10%。圖 4-3 也比較粗網格($169 \times 51 \times 60$ cells)和細網格($193 \times 76 \times 90$ cells)的結果，顯示粗網格和細網格的模擬與實驗值最大的誤差分別為 10.83% 和 13.76%，兩者結果都相當接近。換言之，模擬結果不受網格影響。因此，本研究皆採用粗網格($169 \times 51 \times 60$ cells)的配置進行模擬。

圖 4-4 為比較三種不同的紊流模式(LES model、RNG k- ϵ model、Standard k- ϵ model)模擬單棟建築物迎風面和背風面中心線的壓力係數。圖中實線為 LES 模式模擬的結果、虛線為 RNG k- ϵ model 模擬的結果、點線為 Standard k- ϵ model 模擬的結果。入口邊界採用風洞實驗量得之邊界層流風速剖面，在入口邊界的紊流擾動速度使用頻譜法。結果顯示 LES 模式所模擬的結果比另外兩個模式所模擬結果更接近實驗值。

圖 4-5 比較在 LES 模式中入口邊界處使用不同的紊流速度設定模擬單棟建築物的迎風面和背風面中心線之壓力係數，主要探討不同擾動速度設定的影響。圖中虛線表示在模式中不使用擾動速度的設定、實線表示模式使用頻譜法(spectral synthesizer method)、點線則表示渦流法(vortex method)。從圖中可以看出，在入口邊界處擾動速度設定為頻譜法的計算結果與實驗數據吻合較佳。因此，本研究採取頻譜法的設定用於紊流流速的設定。

上述的實驗及數值模擬計算結果皆是沒有任何開口的建築物，為了測試建

築物開口對壓力係數的影響，利用數值模式計算有開口的建築物。模擬的流況為一棟長方形兩層樓的建築物（高度 6.0 m，寬 3.0 m，長 3.0 m），迎風面和背風面各有一個相同高度和大小的開口。建築物的牆壁厚度是 0.2 m。該建築物每一層樓的室內體積 $V_i = 18.928 \text{ m}^3$ 。迎風面和背風面開口的中心高度位於 $0.816H_b$ ，其開口面積 $A_1 = A_2 = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。入口邊界條件設置為邊界層流 (Boundary Layer flow)，自由流風速 $U_o = 12 \text{ m/s}$ ，邊界層厚度 $\delta = 15 \text{ m}$ 。模擬的風向角為風向角與建築物表面夾角。角度 $\theta = 0^\circ$ ，為建築物迎風面。角度 $\theta = 90^\circ$ ，為建築物側面。角度 $\theta = 180^\circ$ ，為建築物背風面。本數值模式所有的模擬僅一個風向角的角度 $\theta = 0^\circ$ 。在室內的網格皆採用均勻網格 ($\Delta x/H_b = \Delta y/H_b = \Delta z/H_b = 0.033$) 去計算室內流況。

圖 4-6(a) 顯示了二層樓建築物中心線平面上的瞬時速度向量，開口高度範圍在 $z/H_b = 0.733 \sim 0.90$ 。圖中可以看出，建築物在二樓的迎風面開口速度分佈變化為向上流入室內，再從出口改為向下流出室內，在建築物迎風面的底部附近和在屋頂的前緣地方形成了一個渦漩。通過開口的流量可以直接計算平均開口速度乘於開口面積求得，平均時間為 20 秒。計算結果迎風面開口流量為 $Q_{1w} = 5.374 \text{ m}^3/\text{s}$ 和背風面的開口流量為 $Q_{1L} = 5.181 \text{ m}^3/\text{s}$ ，前後開口兩者之間流量的差異為 3.6%，其誤差為合理範圍內。

通風量 Q 可以無因次化通風量 (dimensionless ventilation rate) 表示之：

$$Q^* = \frac{Q}{AU_H}$$

式中 A 為開口面積， $U_H = 10.0 \text{ m/s}$ 是建築物高度處的風速。經由開口面積 $A = A_1 = A_2 = 1.0 \text{ m}^2$ 和風速 $U_H = 10.0 \text{ m/s}$ 代入上式算出無因次通風量 $Q_{2w}^* = 0.537$ 和 $Q_{2L}^* = 0.518$ 。

圖 4-6(b) 顯示上下層皆有開口的二層樓建築物其中心線平面上的瞬時速度向量。第一層樓迎風面和背風面開口的中心高度位於 $0.25H_b$ ，開口高度範圍在 $z/H_b = 0.167 \sim 0.333$ ，其開口面積 $A_1 = A_2 = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 。圖中顯示當氣流流過第一層開口時氣流的方向會往下降，到出口時才會上升離開建築物。透過積分方法計算第一層開口通風量分別為 $Q_{1w} = 4.504 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q_{1L} = 4.392 \text{ m}^3/\text{s}$ ，因此無

因次通風量 $Q_{iw}^* = 0.450$ 和 $Q_{il}^* = 0.439$ ，換言之，二樓的通風量大於一樓。

圖 4-7 是比較有無開口之單棟建築物迎風面和背風面中心線壓力係數的模擬結果。圖中顯示開口對建築物外部表面壓力分佈的影響，除了在非常接近開口處，對其餘區域的影響是微不足道，此數值模擬之結果類似有開口建築物風洞實驗之結果 Chu et al. (2009) 的實驗結果。

將開口附近的壓力係數(位於 $z/H_b = 0.13$ and 0.93)和流量係數 $C_d = 0.65$ 帶入至貫流通風模式，可分別計算出一樓的流量 $Q_1 = 4.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 和二樓的流量 $Q_2 = 5.21 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模擬的流量和經由貫流通風模式算出的流量計算其結果見表 4-1，其上下開口流量的誤差分別為 1.45% 和 1.21%，此微小差異證實沒有開口實體模型(sealed model)的壓力係數可以用來預測的貫流通風流量。

然後本研究計算不同深度($L_b = 3 \sim 20 \text{ m}$)的單棟建築物之貫流通風量，圖 4-8 顯示建築物深度 $L_b/H_i = 3.57$ 的速度向量圖，開口位於此兩層樓建築物的二樓，吹入室內的氣流向上沿屋頂流動。圖 4-9 顯示不同的建築物深度對建築物迎風面和背風面的中心線壓力係數影響。圖中可以看出，建築物深度對建築物迎風面中心線的壓力係數並沒有明顯地影響。但建築物背風面壓力係數由 $C_p = -0.4$ 增加為 $C_p = -0.1$ ，換言之，通風量會因為建築物縱深增加而逐漸降低。圖 4-10 說明建築物深度增加對建築物通風量的變化。當建築物深度 $L_b/H_i > 4.0$ 時，建築物通風量就不再受建築物深度所影響，其通風量約為建築物深度 $L_b/H_i = 1.0$ 通風量的 80%。圖 4-11 為建築物開口中心線上的縱向風速之分佈，本研究模擬結果與 Karava et al. (2011) 的實驗數據、Ramponi & Blocken (2012) 用重整化群模式(RNG k- ϵ)的模擬結果比較，皆十分相近。

接著利用 LES 模式模擬前後兩棟建築物周遭的風場，並與實驗結果比較下風處主建築物迎風面和背風面的中心線壓力係數是否吻合。圖 4-12 和圖 4-13 為不同間距($S/H_b = 1 \sim 6$)兩棟建築物下風處主建築物的迎風面和背風面中心線壓力係數。預測和實測的迎風面中心線壓力係數相當接近，從圖中可清楚看出上風建築物的遮蔽效應影響下風建築物的壓力係數。圖 4-12(a)顯示上風建築物的遮蔽效應使下風建築物在間距 $S/H_b = 3$ 到 $S/H_b = 1$ 時迎風面中心線壓力係數

明顯變小，其在建築物間距 $S/H_b = 1$ 時迎風面壓力係數介於 $C_p = -0.15 \sim 0.12$ 。然而，在兩棟建築物間距 $S/H_b = 6$ 實驗量測和模擬預測的迎風面中心線壓力係數 $C_p = 0.7 \sim 0.85$ 。

第三節 參數研究

本節中使用驗證的大渦模擬 (LES) 模型進行了一系列的數值模擬，探討前後兩棟相鄰建築物間距的影響，上風建築物高度、寬度對下風主建築物的風壓係數和貫流通風量的影響。此系列之模擬為兩層樓建築物在迎風面和背風面的各有一個開口。本系列模擬的建築物外部尺寸為高度 $H_b = 60$ m、寬度 $W_b = 30$ m、深度 $L_b = 30$ m。該模擬的大樓有 20 層，每層樓為 3 m。入口邊界條件設置為邊界層流(Boundary Layer flow)自由流風速 $U_o = 12$ m/s，邊界層厚度 $\delta = 150$ m，風向角的角度 $\theta = 0^\circ$ 。

1. 建築物間距：

首先討論的數值模擬為兩棟相同外型的建築物，建築物之間間距改變對下風主建築物表面上的壓力係數和通風量討論分析。流況條件是用串聯的方式放置兩個相同的建築（建築物高度 $H_b = 60$ m, 寬度 $W_b = 30$ m, 長度 $L_b = 30$ m），與它們之間的不同間距 $S = 0.5 \sim 6.0H_b$ 。建築物是一個沒有任何開口的實體模型。 $S/H_b = 1.0, 2.0, 3.0$ 中心線平面上 ($y/W_b = 0$) 建築物周圍的瞬時速度向量，如圖4-14所示。可以看出，對情況在 $S/H_b = 1.0$ 下風主建築物受顯著的渦流影響。

圖4-15顯示相鄰建築物其下風建築物迎風面和背風面的中心線壓力係數影響。圖中顯示相鄰建築物間距 $S/H_b = 3.0 \sim 6.0$ 的表面壓力係數接近於單棟建築物的壓力係數。然而，由於遮蔽效應，迎風面表面上的壓力係數隨著建築物間距 S 減少而變小。此外，當建築物距離 $S/H_b \leq 1.0$ 時下風主建築物迎風面壓力係數會減少為負壓的情況；其下風主建築物背風面壓力係數當建築物距離 $S/H_b = 2.0 \sim 6.0$ 時係數非常接近，壓力係數介於 -0.4 左右。模擬建築物間距 $S/H_b = 0.5$ ，迎風面中心線壓力係數範圍為 $C_p = -0.50$ 左右，背風面中心線壓力係數範圍 $C_p = -0.15$

~ -0.20，會出現背風面壓力係數大於迎風面壓力係數的情況。換言之，空氣的流向將從背風面的開口吹進建築物，再由迎風面開口流出，形成逆向通風。

利用模式計算出下風主建築物的通風量。開口面積 $A_1 = A_2 = 1.0 \text{ m}^2$ ，兩個開口中心位置皆位於 $z/H_b = 0.75$ 。比較單棟建築物的通風量 Q_0 ，當建築物距離 $S/H_b \leq 1.0$ 時下風主建築物的通風量小於 $0.5Q_0$ 。圖4-16顯示在三種不同的高度（ $z/H_b = 0.25, 0.50, 0.75$ ）透過模式計算比較高低處通風量變化，由此圖可看出在建築物距離 $S/H_b = 0.5$ 時，在 $z = 0.25$ 有較大的通風量，這是因為兩棟建築物過於相近，使其迎風面的風力係數變小，發生逆向通風的情形，而有較大的通風量。其他高度迎風面所受風力影響較大，導致通風量較小。它也表明相鄰建築間距大於建築物高度的4倍會使上風建築物不再影響下風建築物表面壓力和通風量。圖4-17顯示出在不同的建築間距 $S/H_b = 0.5 \sim 6.0$ 其主建築物無因次通風量的垂直剖面。圖中表示，間距小於三倍的建築物高度其下風建築物通風量將顯著降低。

2. 建築物高度：

本節分析不同上風建築物高度 H_u 對下風主建築物表面上的壓力係數和通風量之影響，兩棟建築物間距固定為 $S/H_b = 1.0$ 。圖4-18顯示高度 $H_u/H_b = 0.5 \sim 3.0$ 中心線平面上（ $y/W_b = 0$ ）建築物周圍的瞬時速度向量，可以看出建築物高度 $H_u/H_b = 2.0$ 下風主建築物受顯著的渦流影響。圖4-19描述不同上風建築物高度對主建築物迎風面和背風面中心線壓力係數的影響。圖4-19(a)說明當上風建築物高度 $H_u/H_b > 1.0$ 時，下風主建築物的迎風面高度 $z/H_b > 0.5$ 處壓力係數會變小。模式計算出下風主建築物的通風，開口面積 $A_1 = A_2 = 1 \text{ m}^2$ ，兩個開口中心位置皆位於 $z/H_b = 0.75$ 。正如預期的那樣，掩護效應是依賴於上風建築物的高度。

圖4-20顯示透過貫流通風模式計算不同上風建築物高度影響下風主建築物通風量的變化。在上風建築物高度在 $H_u/H_b = 2.0$ 時主建築物高處（ $z/H_b = 0.75$ ）通風量只有 $0.2 Q_s^*$ ，通風效果相當不理想。而當上風建築物高度在 $H_u/H_b = 0.5$ 時，主建築物高處（ $z/H_b = 0.75$ ）通風量還有 $0.8 Q_s^*$ 。圖4-21顯示出在不同上風建

築物高度其主建築物無因次通風量的垂直剖面。圖中表示，當上風建築物高度 $H_u/H_b \geq 1.0$ 其下風建築物通風量將顯著降低。

3. 建築物寬度：

在這個部份的模擬不同上風建築物寬度對下風主建築物表面上的壓力係數和通風量探討。流況條件是放置兩個相同的建築，兩棟建築物間距固定為 $S/H_b = 1.0$ 。 $W_u/W_b = 0.5 \sim 2.0$ 中心線平面上 ($z/H_b = 0.5$) 建築物周圍的瞬時速度向量，如圖 4-22 所示。可以看出，對情況在 $W_u/W_b = 2.0$ 時下風主建築物受到上風建築物產生許多的尾流所造成的渦流影響。這一結果表明，上風建築物寬度影響範圍。

圖 4-23 描述不同上風建築物寬度對主建築物迎風面和背風面中心線壓力係數的影響。圖中主建築物迎風面中心線壓力係數受到上風建築物寬度較大的影響，當上風建築物寬度加寬時，會導致迎風面中心線壓力係數 C_{p1} 變成負壓。在上風建築物寬度 $W_u/W_b = 1.5$ 、 2.0 時，就會出現背風面壓力大於迎風面壓力的狀況，會產生逆向通風的現象。

下風主建築的貫流通風量計算結果，開口面積 $A_1 = A_2 = 1 \text{ m}^2$ ，兩個開口中心位置皆位於 $z/H_b = 0.75$ 。圖 4-24 顯示透過貫流通風模式計算不同上風建築物寬度影響下風主建築物通風量的變化。當上風建築物高度在 $W_u/W_b > 1.0$ 時，主建築物高處 ($z/H_b = 0.75$) 通風量介於 $0.3 \sim 0.5 Q_0^*$ 。圖 4-25 顯示出在不同的上風建築寬度 $W_u/W_b = 0.5 \sim 2.0$ 其主建築物無因次通風量的垂直剖面。圖中表示，當上風建築物寬度 $W_u/W_b \geq 1.0$ 其下風建築物無因次通風量 $Q^* = 0.2$ 。

圖 4-26 顯示有開口的單棟建築物寬度 $W_b = 3.0 \text{ m}$ 和 6.0 m 的流速向量圖。建築物的深度 3 m ，高度 6 m ，只有二樓的迎風、背風面有開口，開口中心處高度 $z/H_b = 0.816$ 。透過積分方式計算建築物寬度 3.0 m 的通風量分別為 $Q_{2w} = 5.37 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q_{2L} = 5.18 \text{ m}^3/\text{s}$ ，而建築物寬度 6.0 m 的通風量 $Q_{2w} = 5.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q_{2L} = 5.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此，單棟建築物有開口的情況下，建築物寬度由 3.0 m 變為 6.0 m 對通風量並無太大的影響。

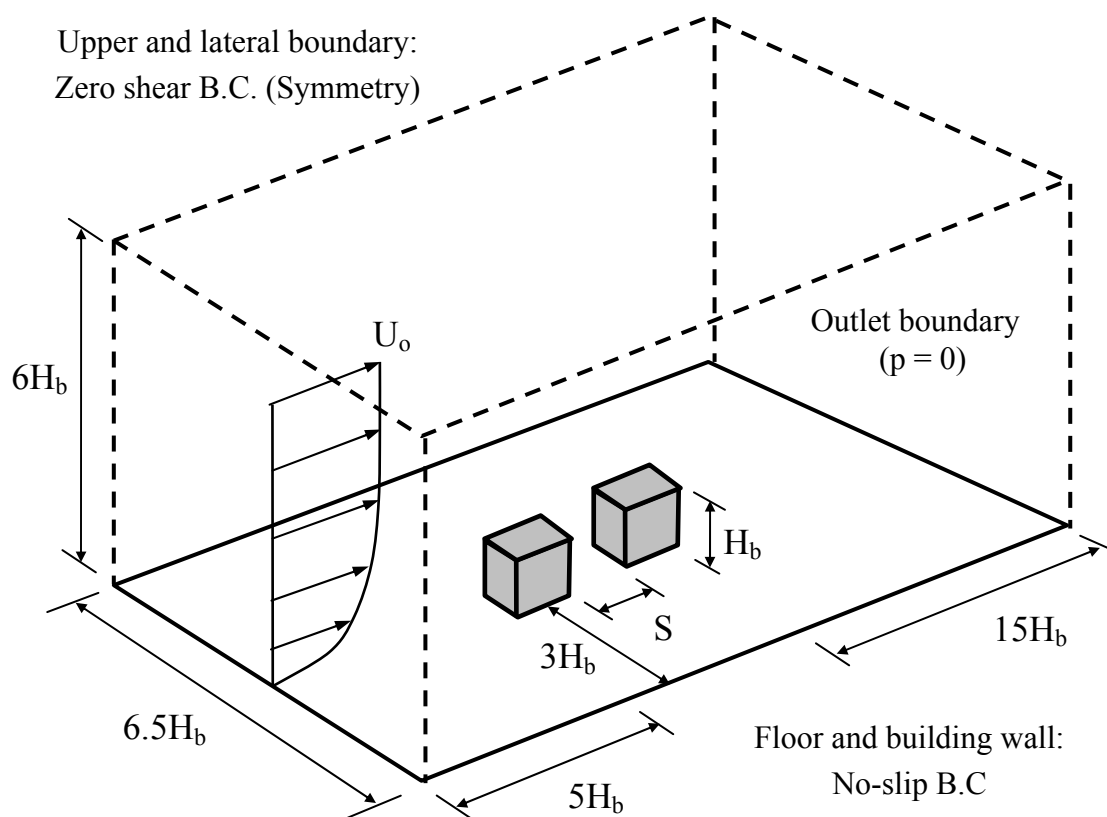


圖 4-1 計算域的示意圖

資料來源：本研究整理

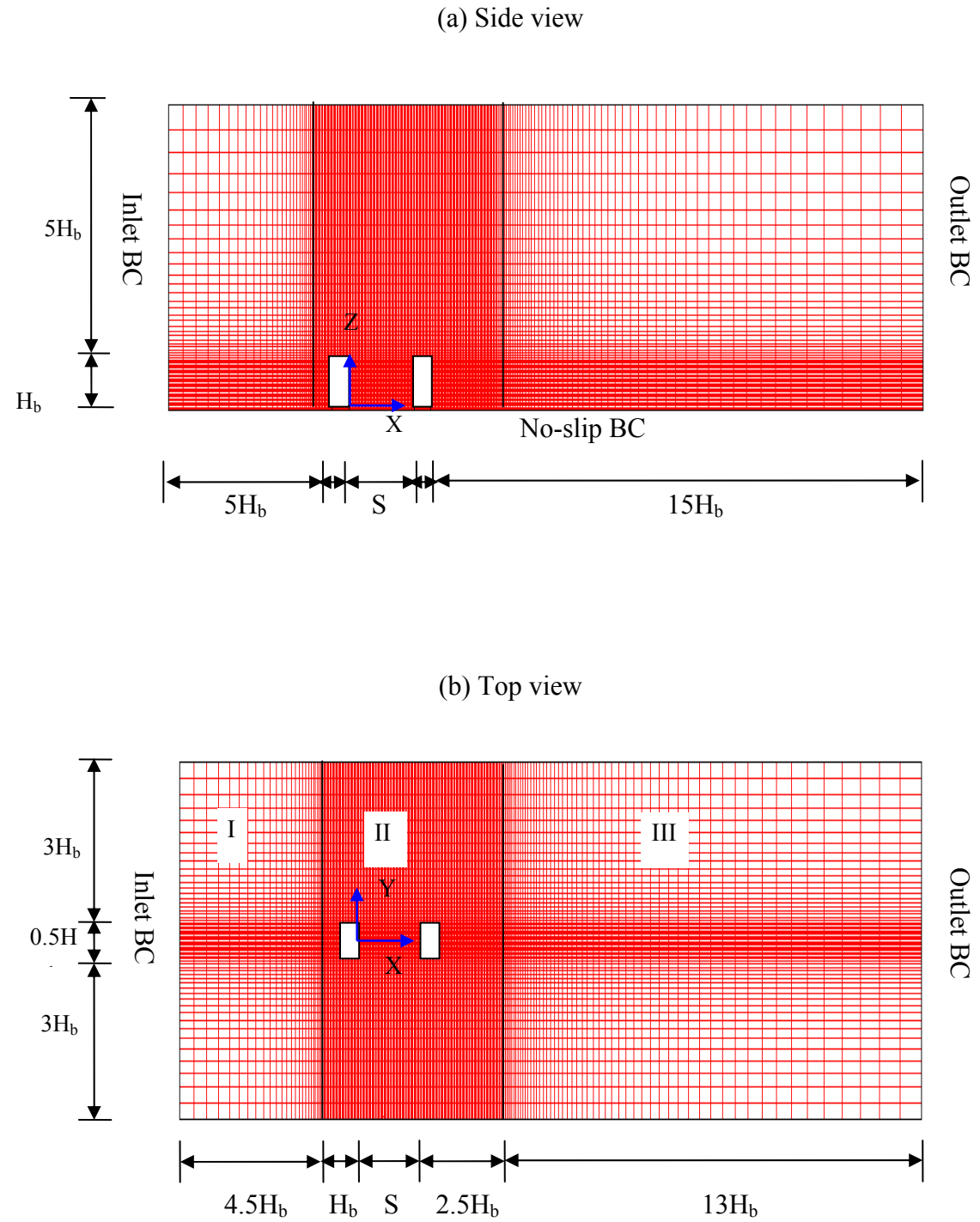


圖 4-2 計算網格分佈圖 (a)側視圖; (b)俯視圖

資料來源：本研究整理

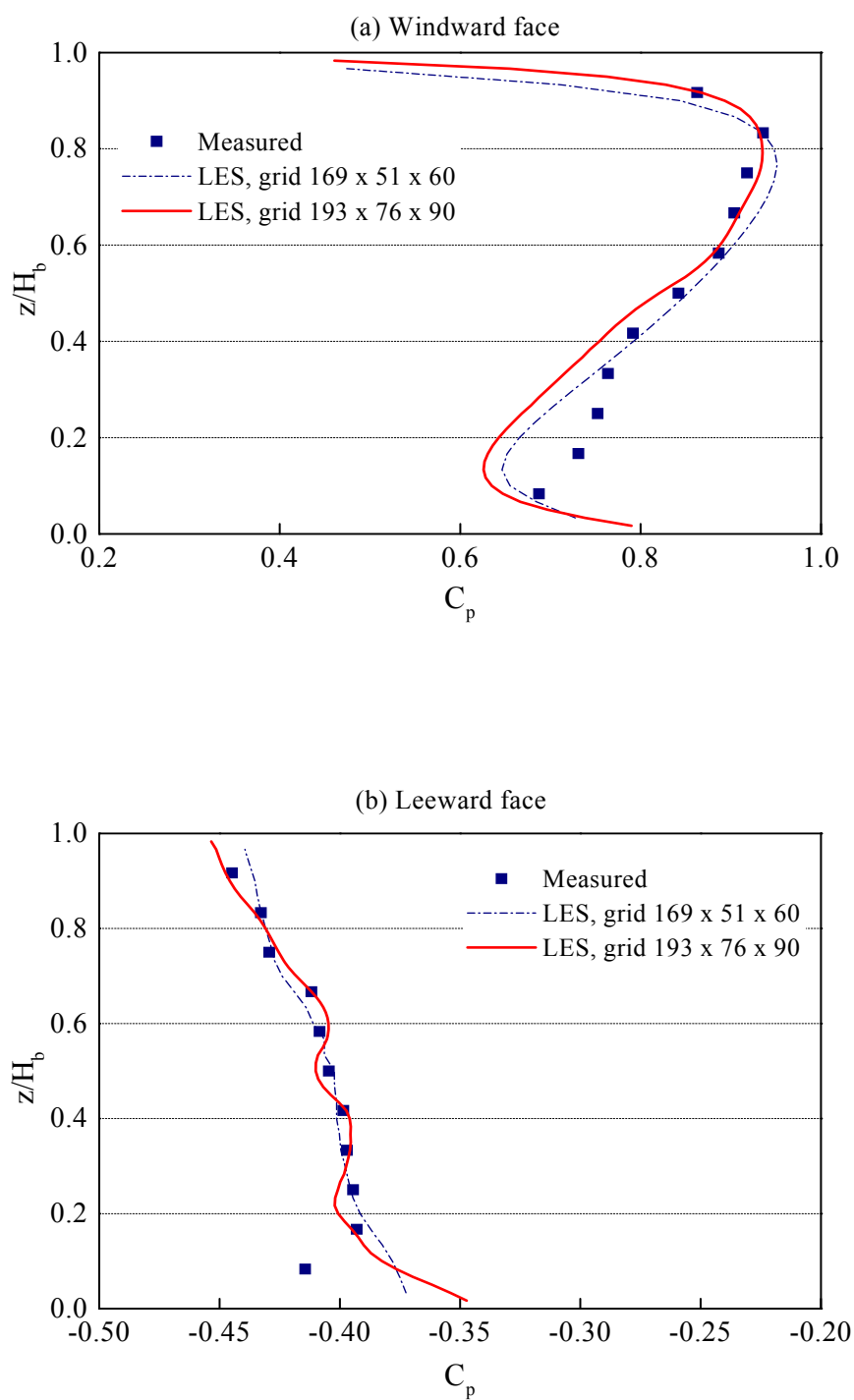


圖4-3 單棟建築物實驗和模擬之迎風面和背風面中心線的壓力係數圖 (a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

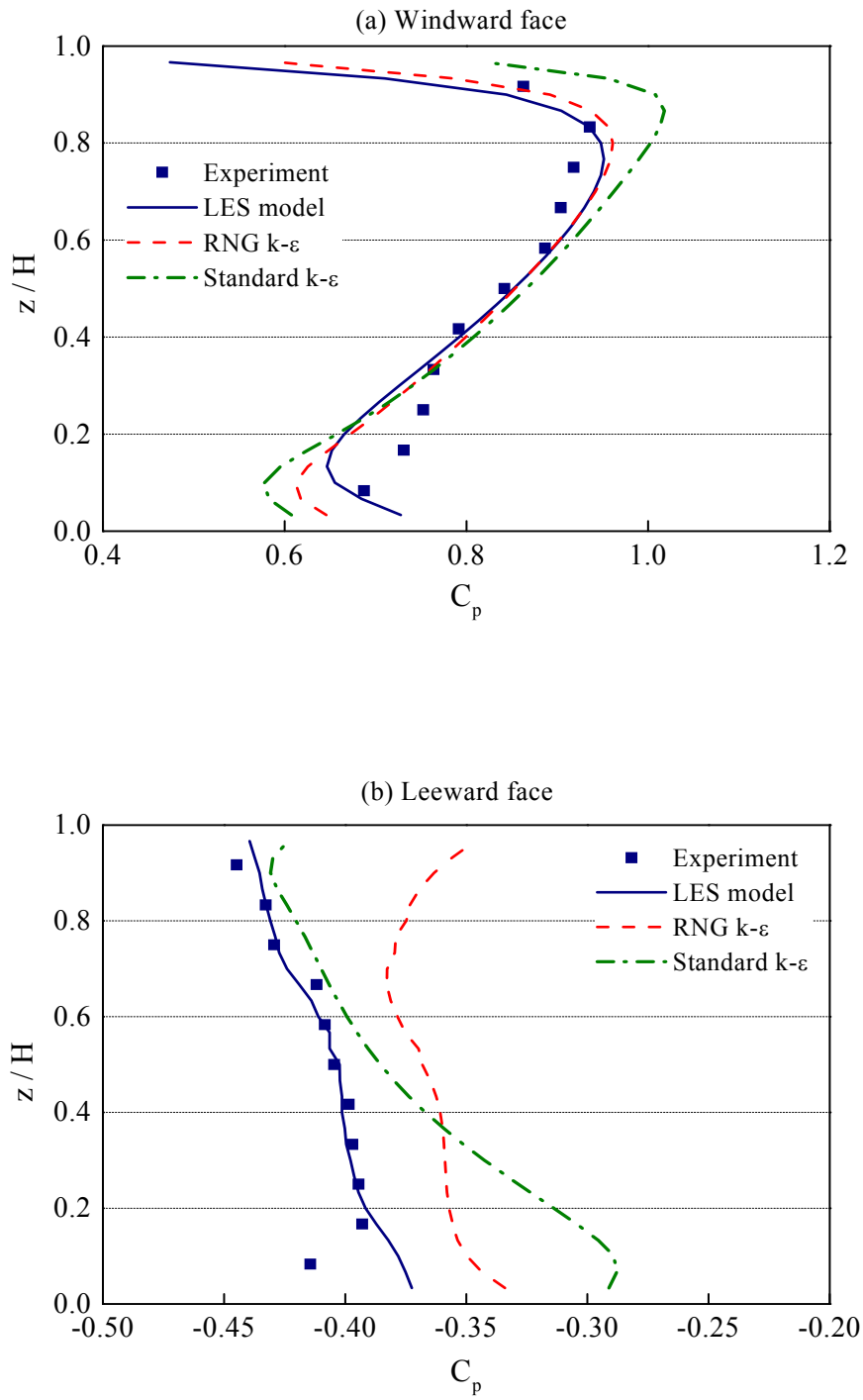


圖 4-4 比較三種模式模擬之迎風面和背風面的壓力係數 (a)迎風面;(b)背風面
資料來源：本研究整理

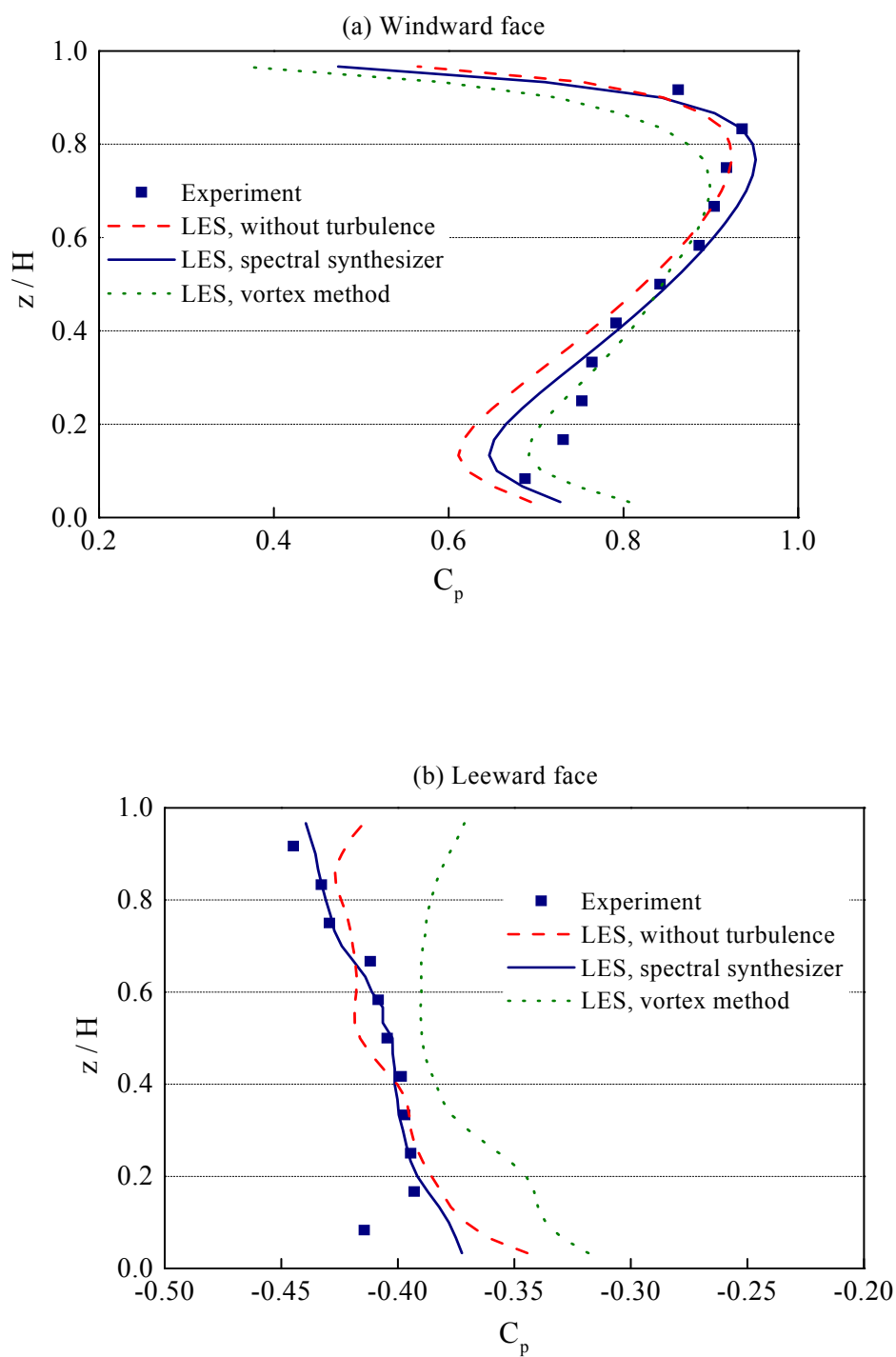


圖 4-5 比較不同擾動速度設定之模擬結果 (a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

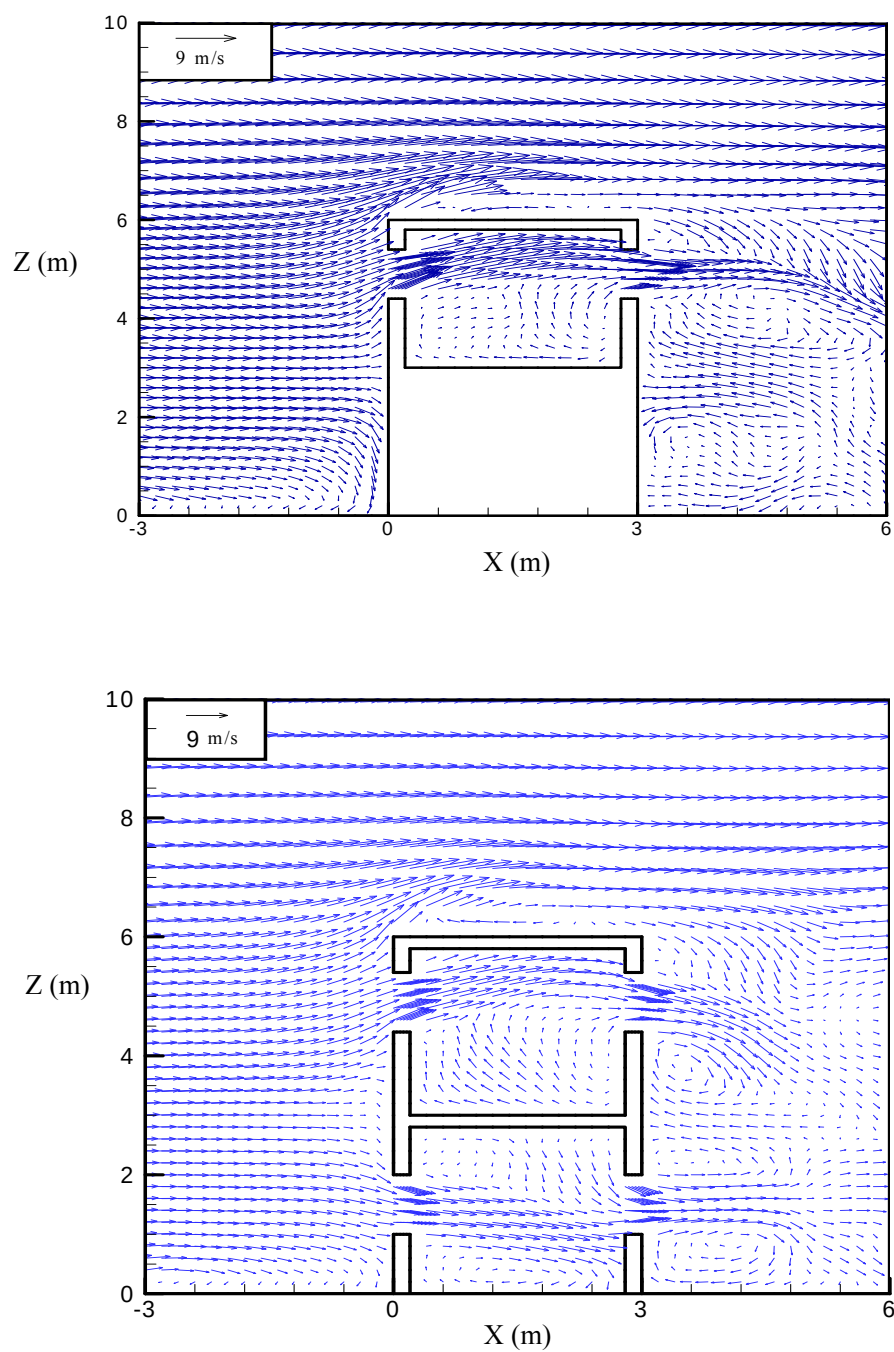


圖 4-6 兩層樓建築物的速度向量圖，建築物深度 $L_b/H_i = 1.07$ (a)開口位於二樓 (b) 二層樓皆有開口

資料來源：本研究整理

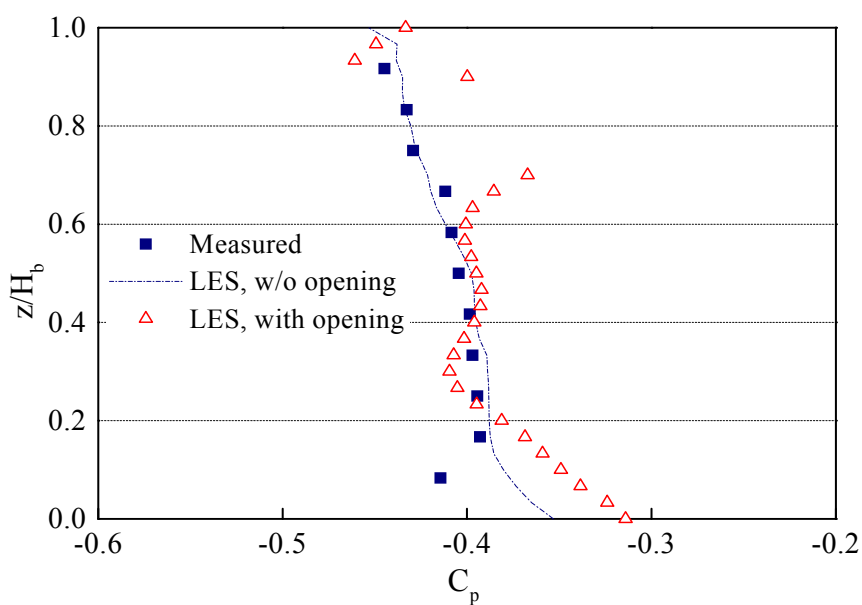
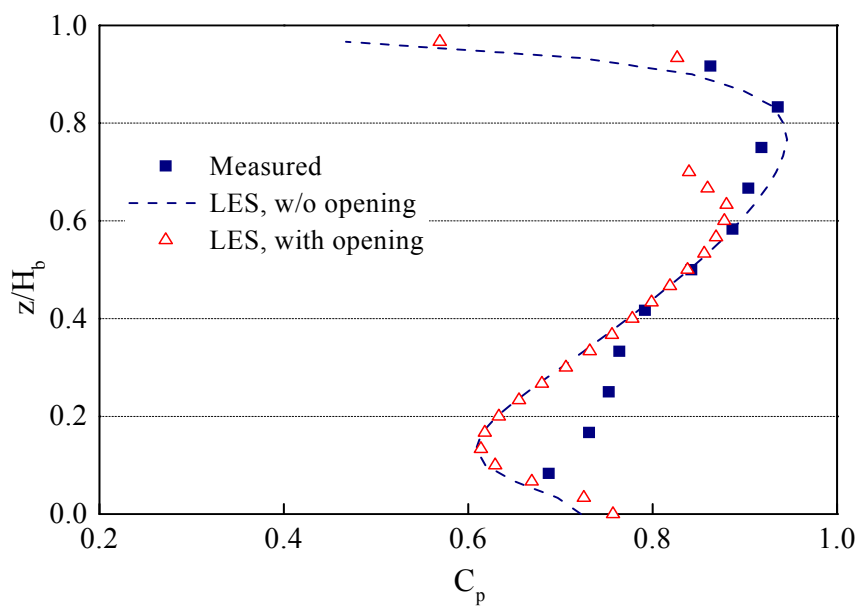


圖 4-7 兩層樓建築物有無開口其迎風面和背風面中心線的壓力係數圖 (a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

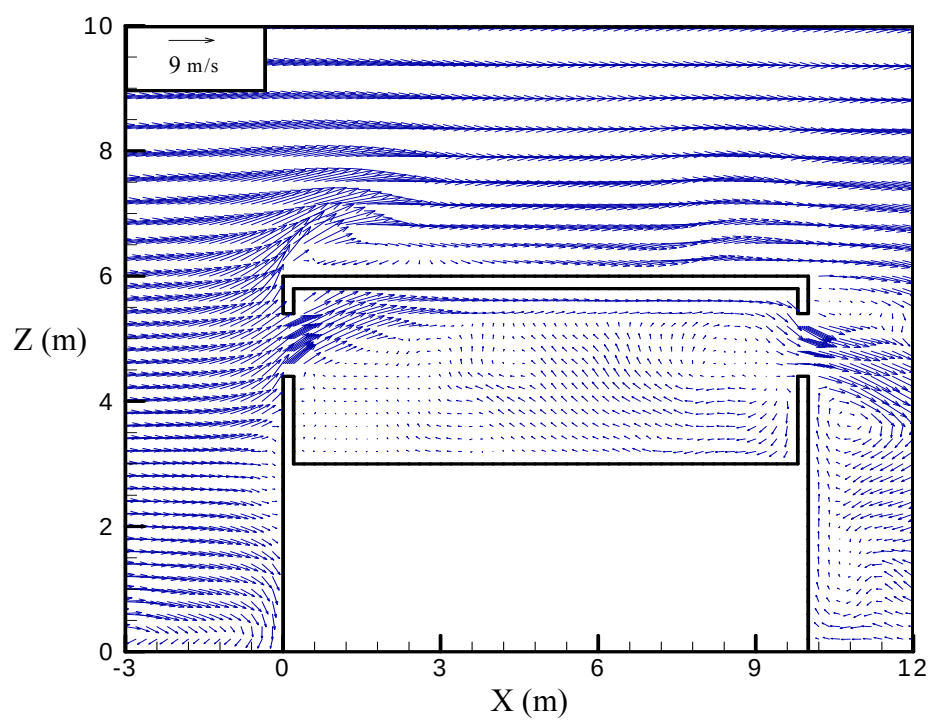


圖 4-8 兩層樓建築物的速度向量圖，建築物深度 $L_b/H_i = 3.57$ ，開口位於二樓

資料來源：本研究整理

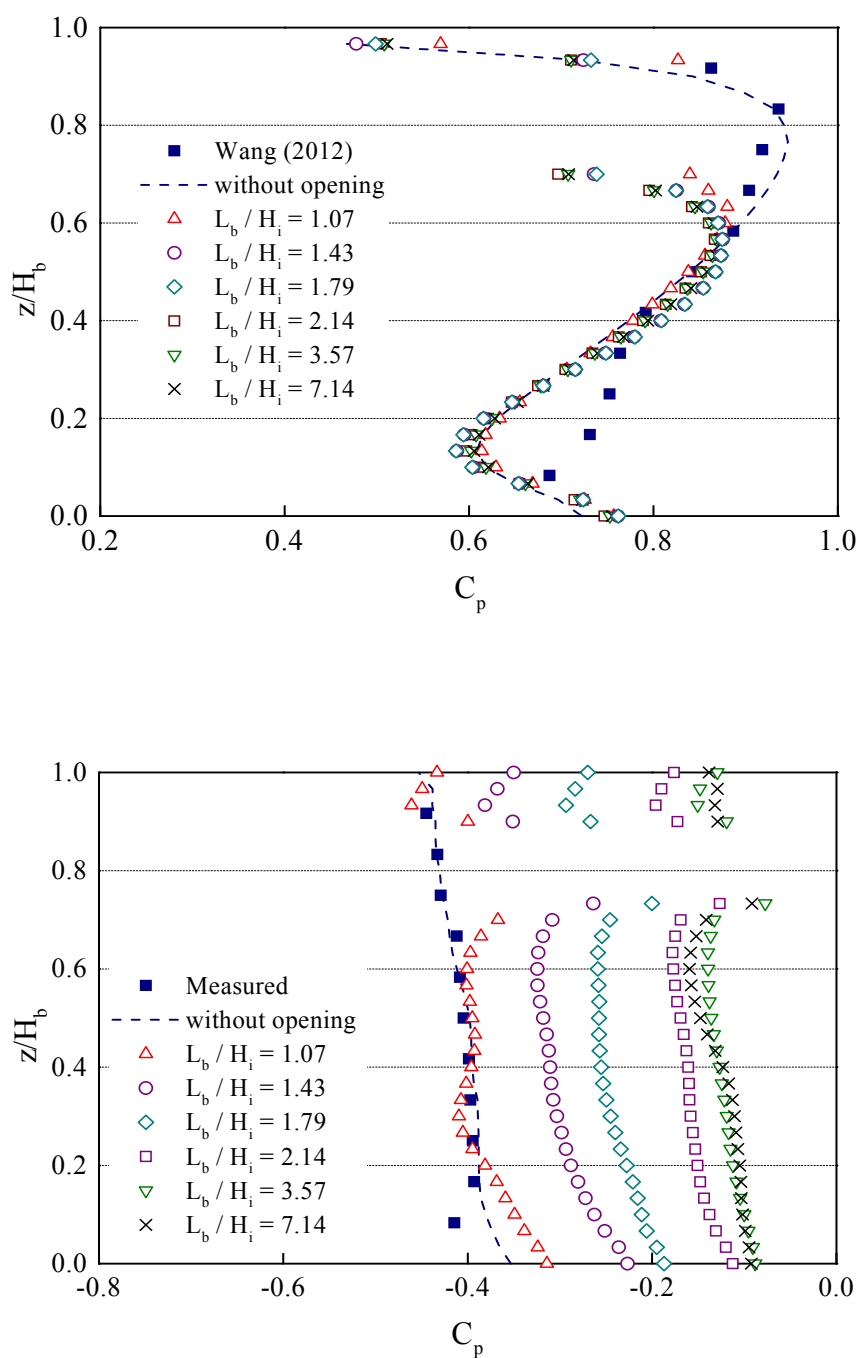


圖 4-9 建築物深度影響迎風面和背風面中心線的壓力係數圖 (a) 迎風面; (b) 背風面

資料來源：本研究整理

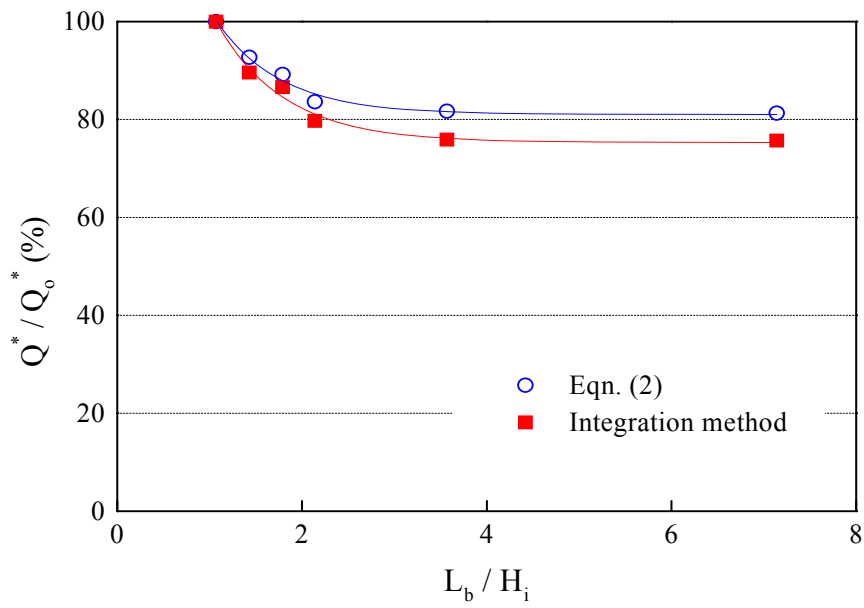


圖 4-10 建築物深度對通風量之影響

資料來源：本研究整理

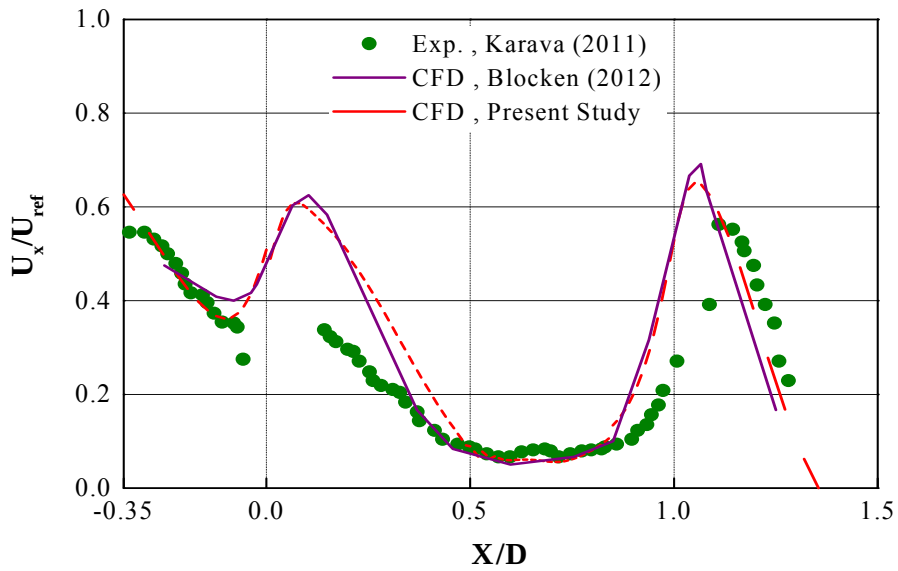


圖 4-11 建築物開口中心線上的縱向風速之分佈

資料來源：本研究整理

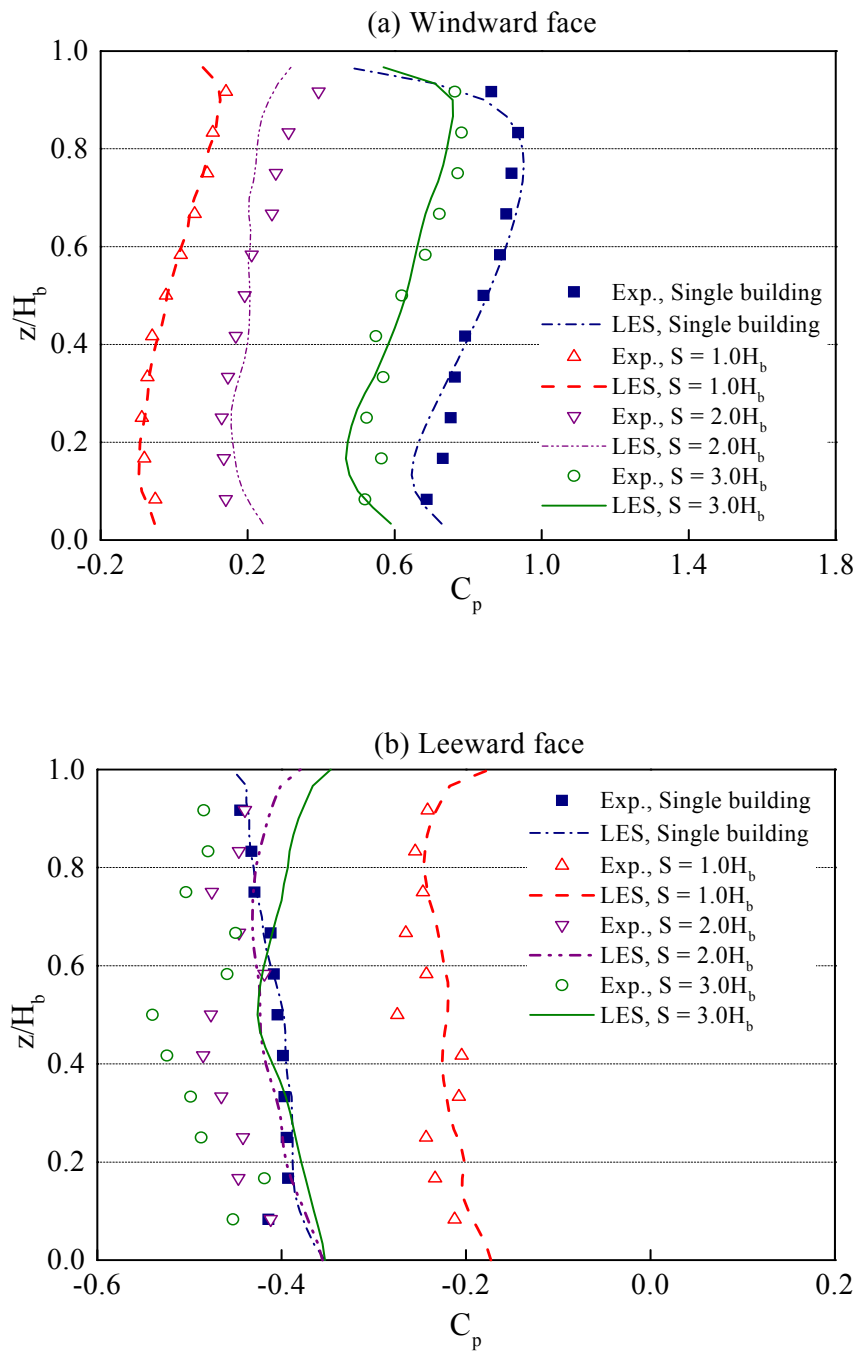


圖 4-12 雙棟建築物間距 $S = 1 \sim 3H_b$ 下風建築物的壓力係數 (a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

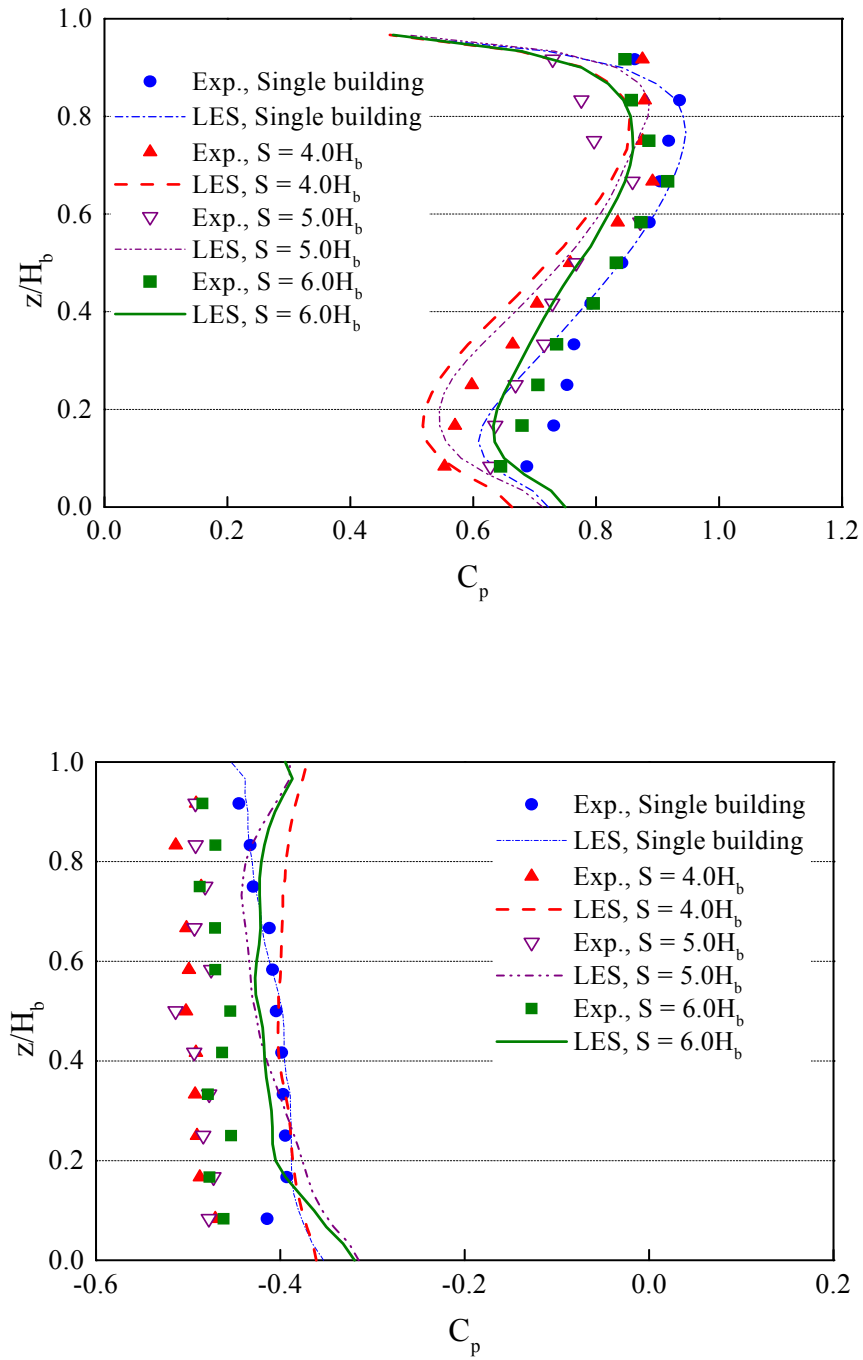


圖 4-13 雙棟建築物間距 $S = 4 \sim 6H_b$ 下風建築物的壓力係數 (a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

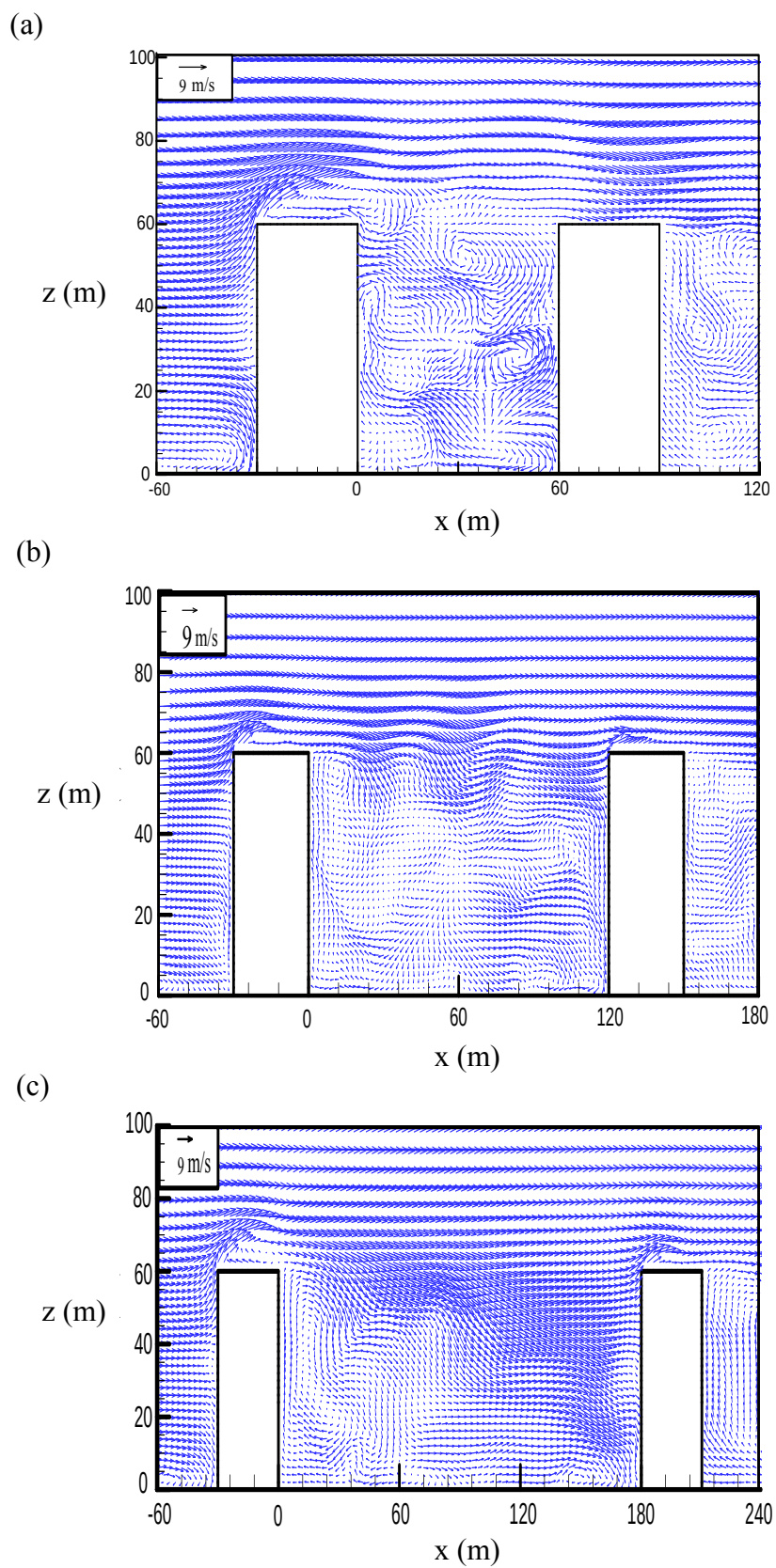


圖 4-14 不同建築物間距其雙棟建築物的速度向量圖(a) $S/H_b = 1$; (b) $S/H_b = 2$; (c) $S/H_b = 3$.

資料來源：本研究整理

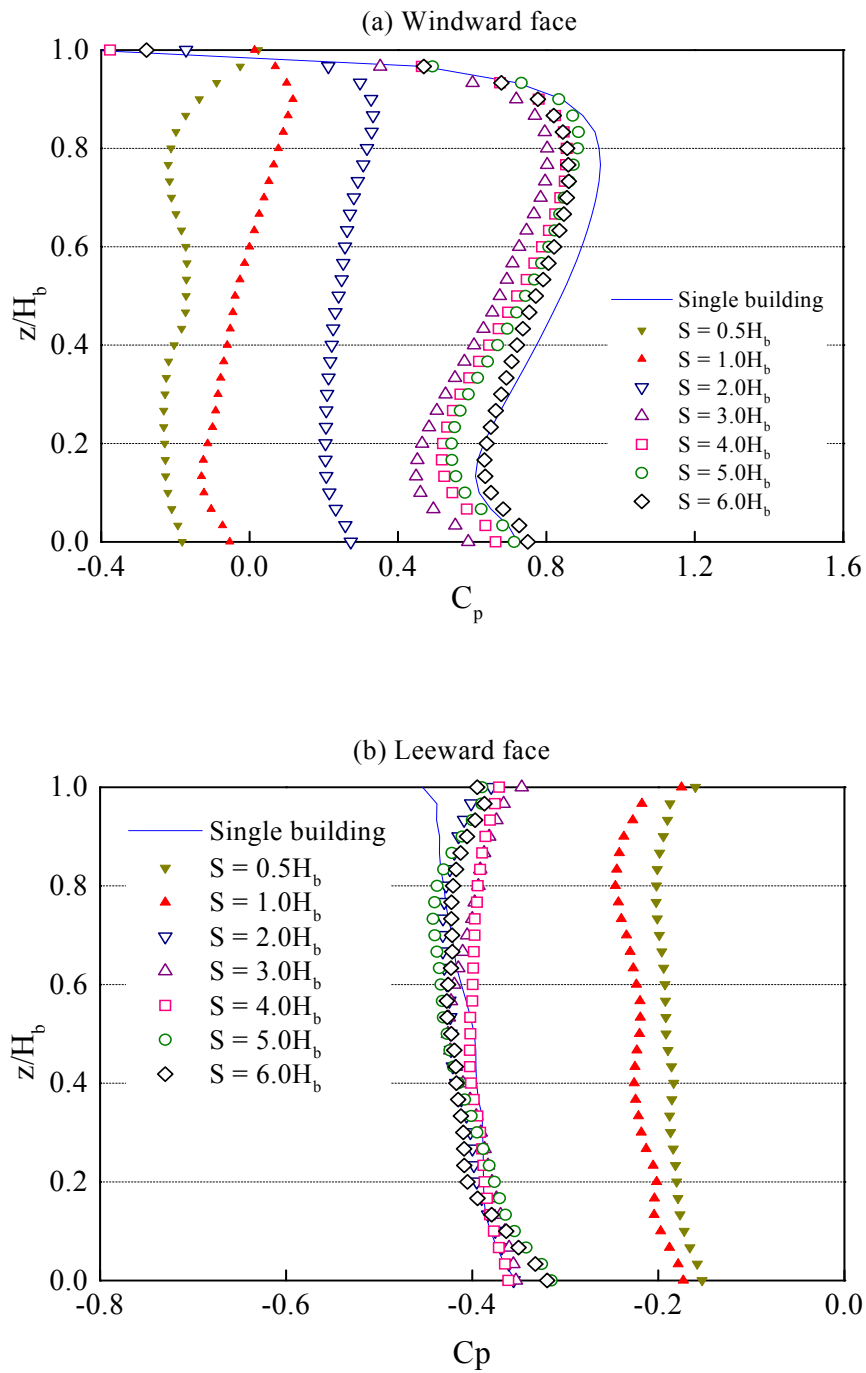


圖 4-15 不同建築物間距下風建築物的壓力係數圖 (a)迎風面;(b)背風面

資料來源：本研究整理

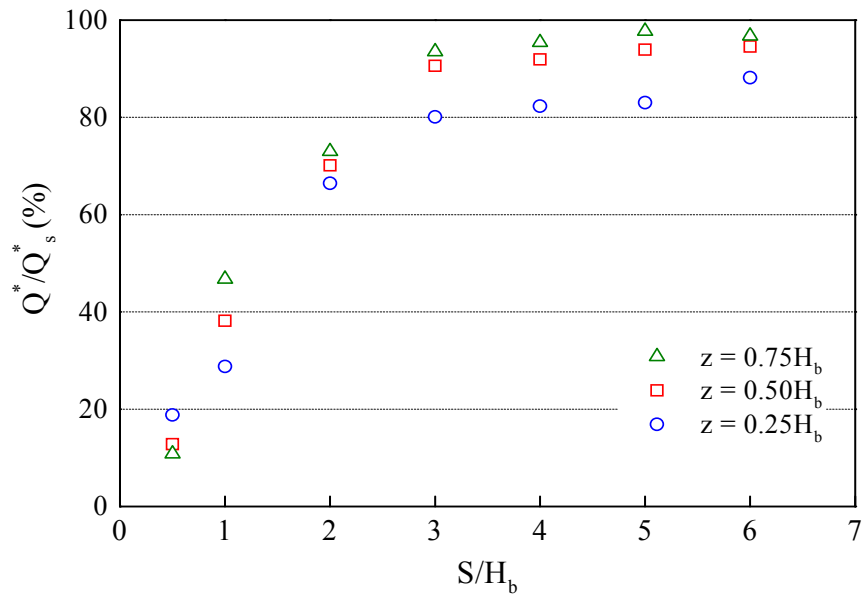
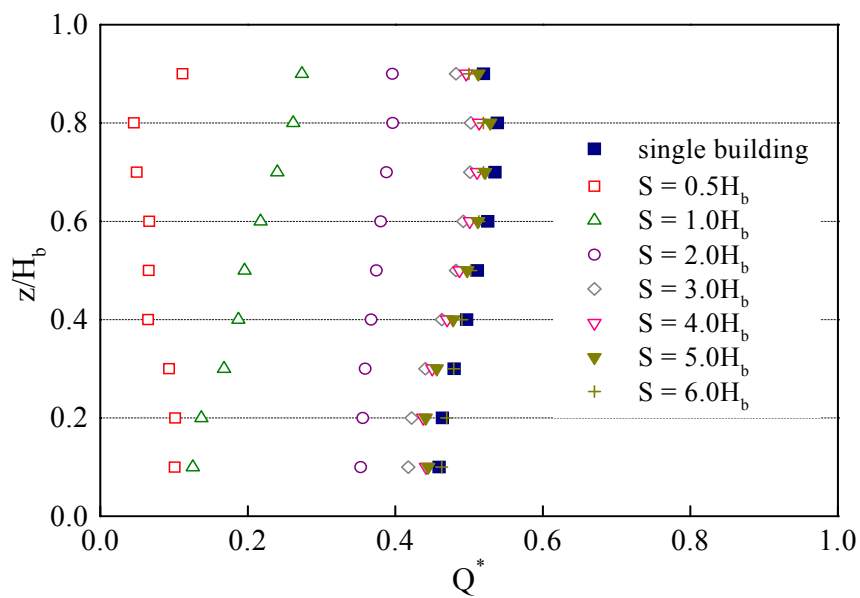


圖 4-16 不同建築物間距影響下風建築物的通風量

資料來源：本研究整理

圖 4-17 不同建築物間距 S/H_b 下風建築物的流量分佈圖

資料來源：本研究整理

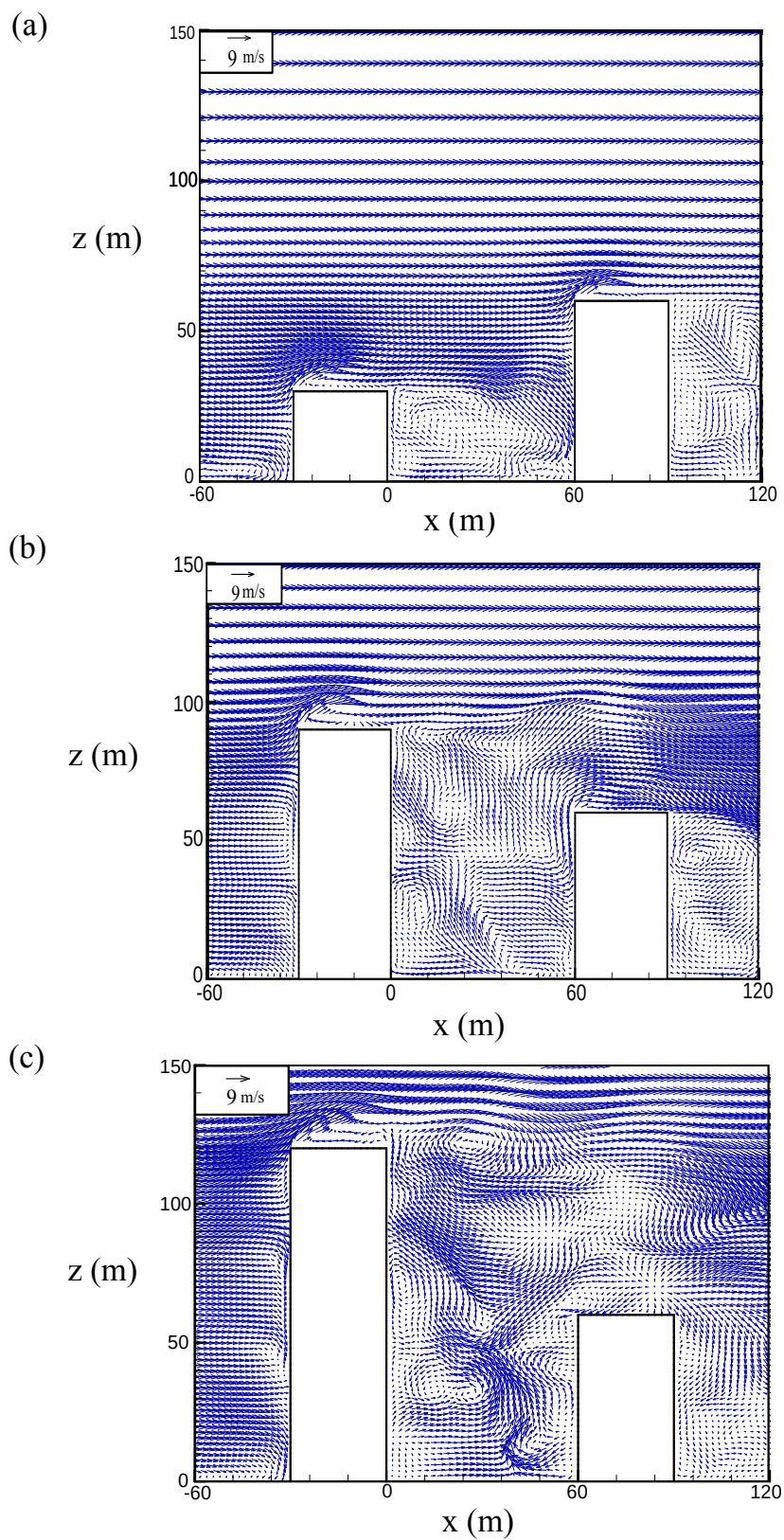


圖 4-18 不同高度的上風建築物之速度向量圖($y/W_b = 0$)

資料來源：本研究整理

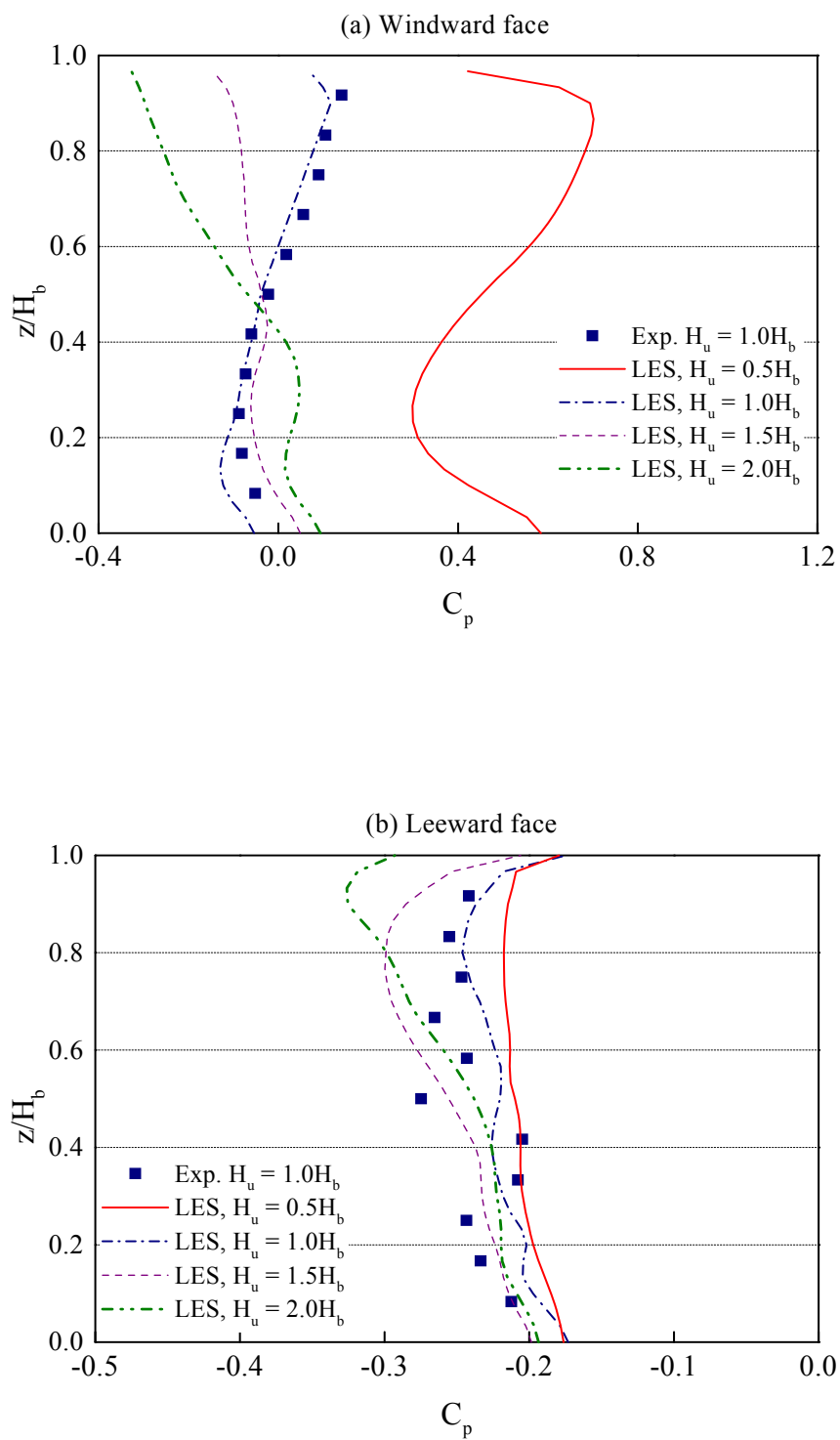


圖 4-19 不同高度的上風建築物之下風建築物的壓力係數圖 (a)迎風面; (b)背風面

資料來源：本研究整理

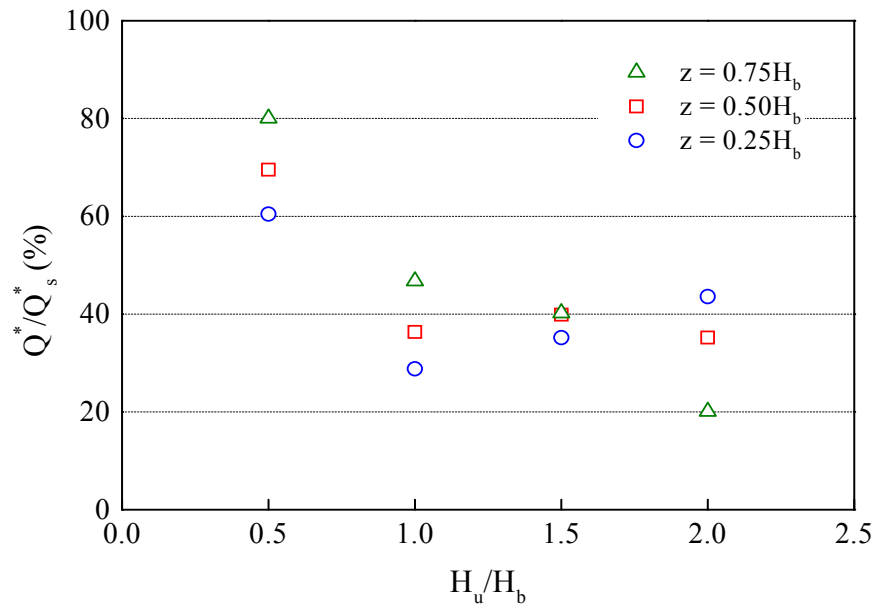


圖 4-20 不同高度的上風建築物對下風建築物通風量之影響

資料來源：本研究整理

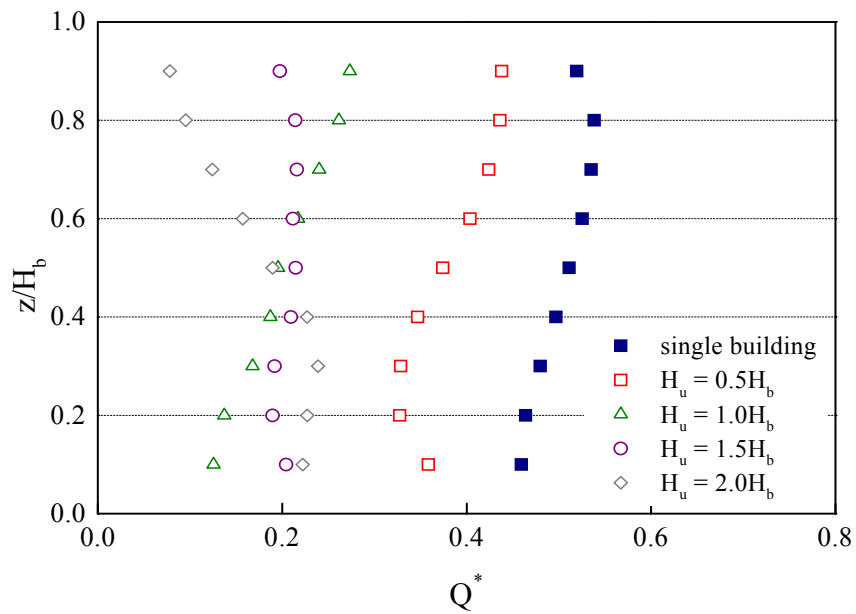


圖 4-21. 不同高度的上風建築物之無因次流量分佈圖

資料來源：本研究整理

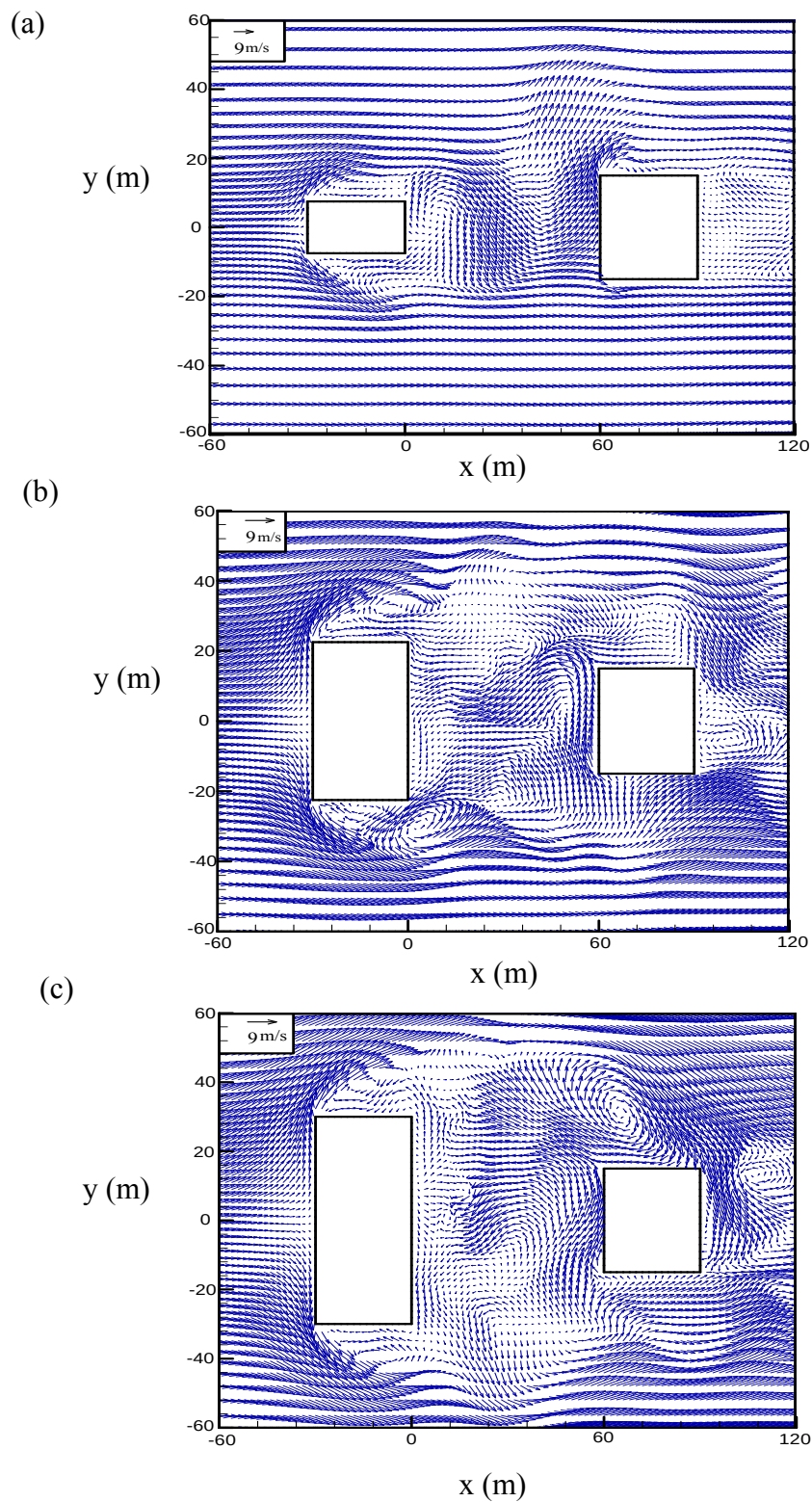


圖 4-22. 不同寬度之上風建築物的速度向量圖($z/H_b = 0.5$) (a) $W_u/W_b = 0.5$; (b) $W_u/W_b = 1.5$; (c) $W_u/W_b = 2$.

資料來源：本研究整理

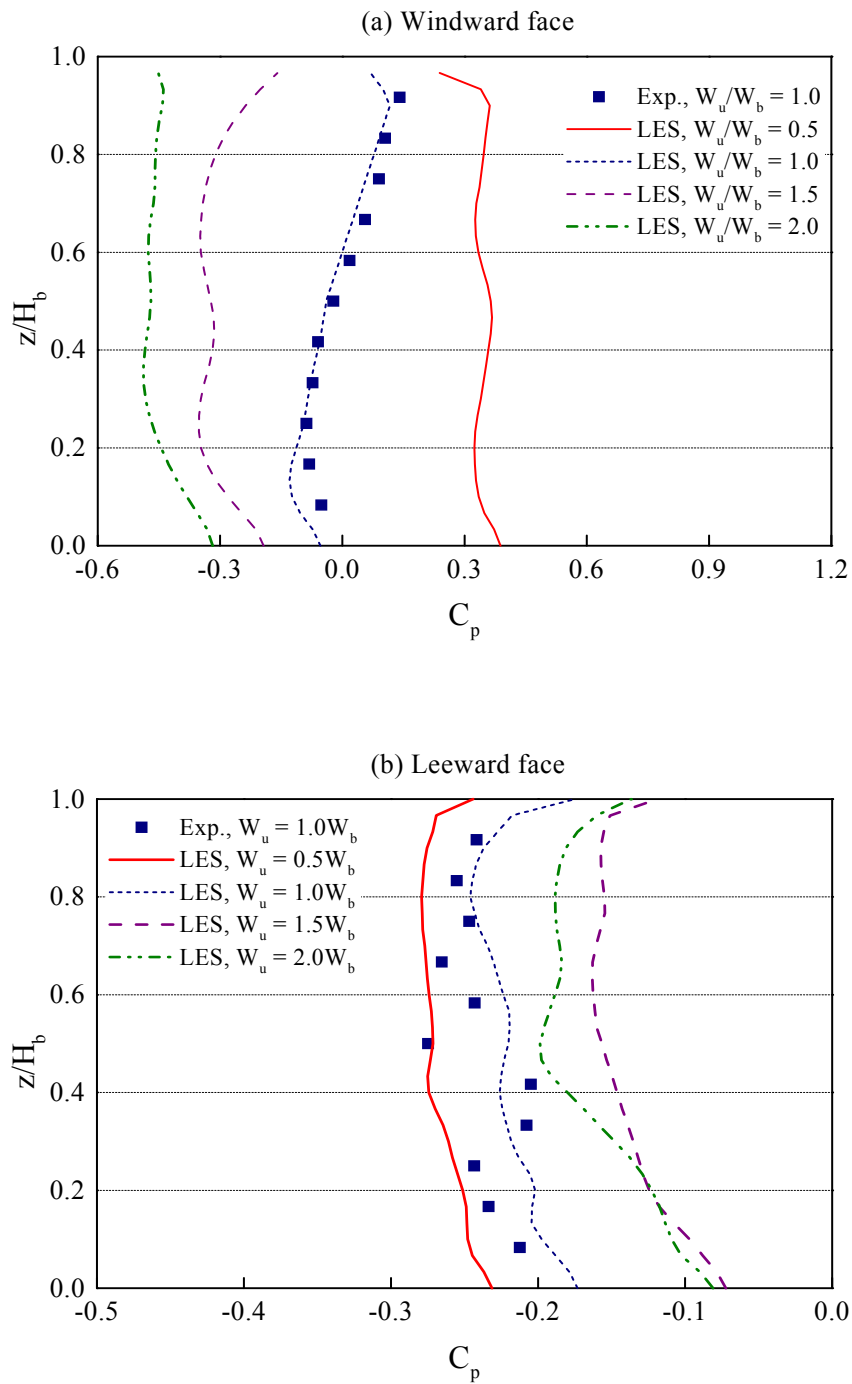


圖 4-23. 不同寬度之上風建築物的下風建築物壓力係數圖 (a)迎風面;(b)背風面

資料來源：本研究整理

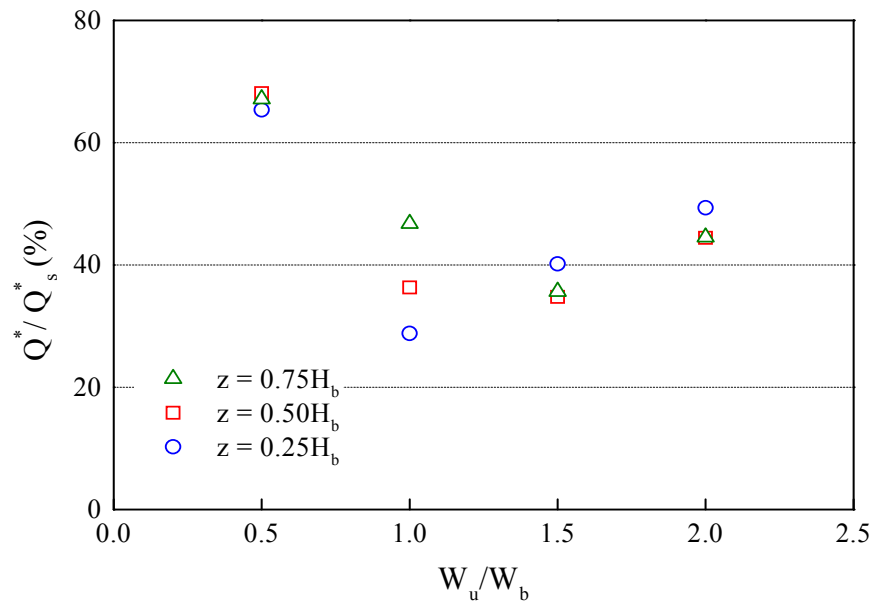


圖 4-24. 不同寬度之上風建築物對下風建築物通風量的影響

資料來源：本研究整理

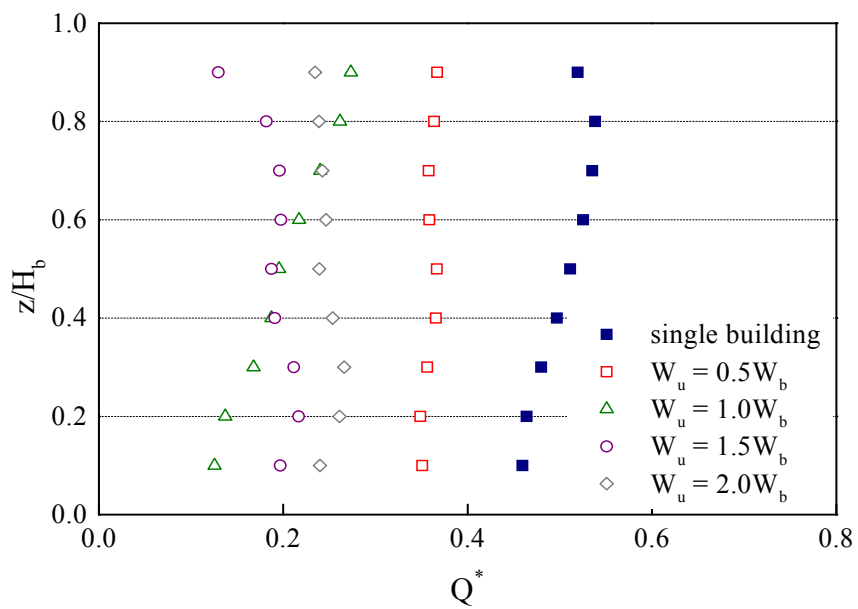


圖 4-25 不同寬度之上風建築物的下風建築物的無因次流量分佈圖

資料來源：本研究整理

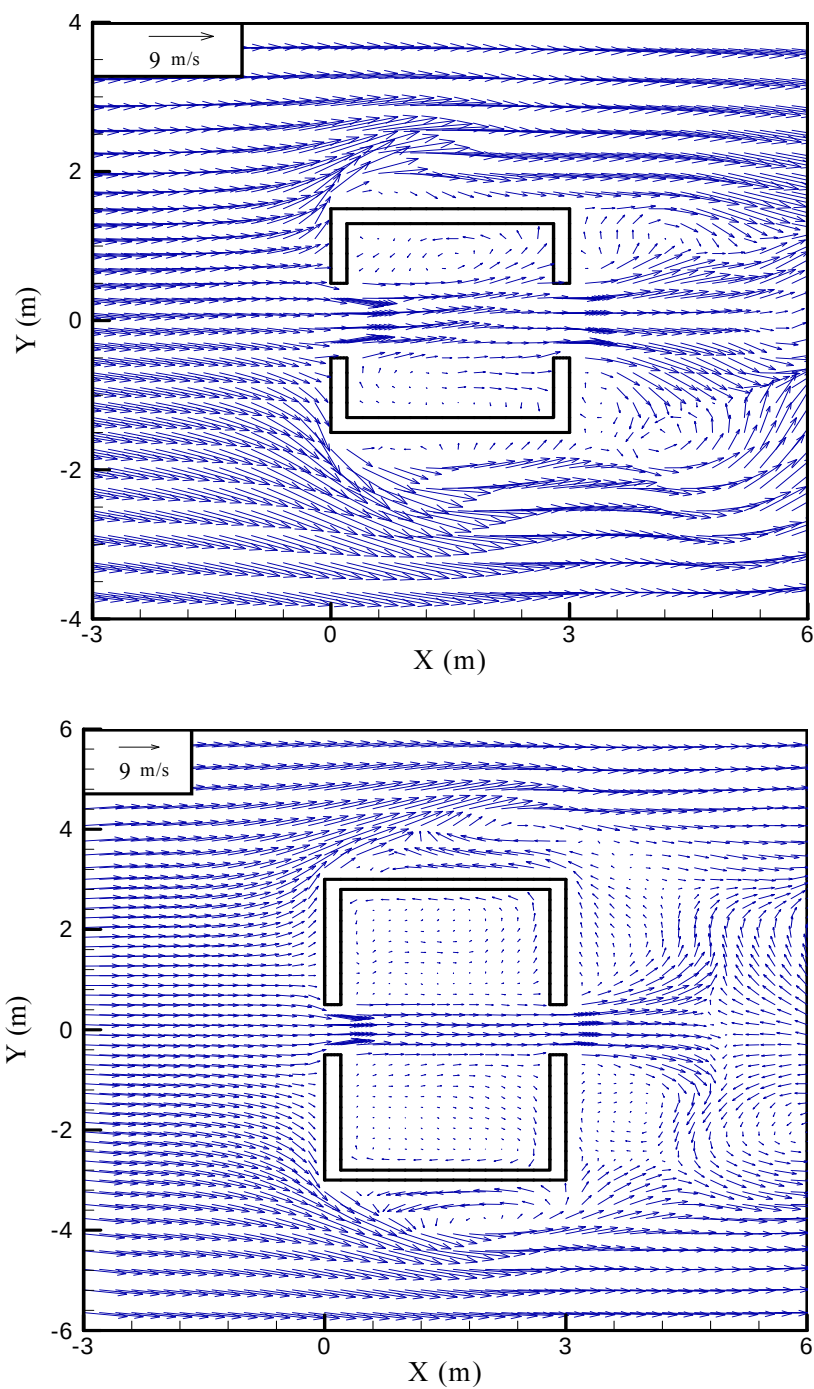


圖 4-26 不同寬度之建築物的速度向量圖，開口中心高度 $z/H_b = 0.816$ (a) $W_b = 3.0$ m; (b) $W_b = 6.0$ m.

資料來源：本研究整理

表 4-1 比較積分法和由通風模式計算得之通風量

L_b/H_i	Floor	積分法			通風模式	
		Q_w^*	Q_L^*	Q_{avg}^*	Q^*	Δ (%)
1.07	1 st	0.450	0.439	0.445	0.438	1.45
	2 nd	0.537	0.518	0.528	0.521	1.21
3.57	2 nd	0.407	0.402	0.405	0.426	5.04

建築物高度的風速 $U_H = 10$ m/s. 開口中心高度 $z/H_b = 0.25$ (1st)和 0.816 (2nd)

資料來源：本研究整理

表 4-2 A 系列模擬參數

	L_b/H_i	$V_i (m^3)$	Grid number ($\Delta X \times \Delta Y \times \Delta Z$)	Domain size L, W, H (m)	Br (%)
Case A1	1.07	18.928	169 x 51 x 60	123, 39, 36	1.28
Case A2	1.43	26.208	174 x 51 x 60	124, 39, 36	1.28
Case A3	1.79	33.488	179 x 51 x 50	125, 39, 36	1.28
Case A4	2.14	40.768	184 x 51 x 60	126, 39, 36	1.28
Case A5	3.57	69.888	204 x 51 x 60	130, 39, 36	1.28
Case A6	7.14	142.688	254 x 51 x 60	140, 39, 36	1.28

H_i 為室內高度， V_i 為室內體積， $U_H = 10 \text{ m/s}$

資料來源：本研究整理

表 4-3 A 系列的模擬結果

	C_{p1}	C_{p2}	$\Delta P \text{ (Pa)}$	$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	Q^*	$Q^* / Q_o^* \text{ (%)}$
Case A1	0.826	-0.461	77.22	5.21	0.52	100.0
Case A2	0.724	-0.381	66.30	4.83	0.48	92.6
Case A3	0.732	-0.293	61.50	4.65	0.47	89.2
Case A4	0.706	-0.196	54.12	4.37	0.44	83.7
Case A5	0.710	-0.151	51.66	4.26	0.43	81.7
Case A6	0.713	-0.138	51.06	4.24	0.42	81.3

Q_o^* 為 case A1 的無因次流量

資料來源：本研究整理

表 4-4 模擬各系列的參數表

	L_b/H_b	H_u/H_b	W_u/W_b	S/H_b	Br (%)	openings
Series B	0.5	1.0	1.0	0.5~6.0	1.28	No
Series C	0.5	0.5~2.0	1.0	1.0	1.28	No
Series D	0.5	1.0	0.5~2.0	1.0	1.28~2.56	No

資料來源：本研究整理

表 4-5 系列 B 的參數.

	S/H_b	H_u/H_b	W_u/W_b	Grid number ($\Delta X \times \Delta Y \times \Delta Z$)	Domain size L, W, H (m)	Br (%)
Case A	0	0	0	169 x 51 x 60	1230, 390, 360	1.28
Case B1	0.5	1.0	1.0	173 x 51 x 60	1290, 390, 360	1.28
Case B2	1.0	1.0	1.0	188 x 51 x 60	1320, 390, 360	1.28
Case B3	2.0	1.0	1.0	218 x 51 x 60	1380, 390, 360	1.28
Case B4	3.0	1.0	1.0	248 x 51 x 60	1440, 390, 360	1.28
Case B5	4.0	1.0	1.0	278 x 51 x 60	1500, 390, 360	1.28
Case B6	5.0	1.0	1.0	308 x 51 x 60	1560, 390, 360	1.28
Case B7	6.0	1.0	1.0	338 x 51 x 60	1620, 390, 360	1.28

Case A 為單棟建築物的模擬。建築物高度風速 $U_H = 10$ m/s.

資料來源：本研究整理

表 4-6 系列 B 的模擬結果 (開口高度 $z = 0.75H_b$)

	C_{p1}	C_{p2}	ΔP (Pa)	Q (m^3/s)	Q^*	$Q^* / Q_s^* (\%)$
Case A	0.943	-0.427	82.24	5.38	0.54	100.0
Case B1	-0.217	-0.202	-0.96	0.56	0.06	10.4
Case B2	0.056	-0.241	17.98	2.50	0.25	46.5
Case B3	0.299	-0.431	43.79	3.93	0.39	73.0
Case B4	0.799	-0.398	71.87	5.03	0.50	93.4
Case B5	0.851	-0.396	74.85	5.13	0.51	95.4
Case B6	0.867	-0.441	78.49	5.26	0.53	97.7
Case B7	0.859	-0.422	76.93	5.20	0.52	96.7

Q_s^* 為單棟建築物的無因次流量 (Case A)

資料來源：本研究整理

表 4-7. 系列 C 的參數

	S/H_b	H_u/H_b	W_u/W_b	Grid number ($\Delta X \times \Delta Y \times \Delta Z$)	Domain size L, W, H (m)	Br (%)
Case A	-	-	-	169 x 51 x 60	1230, 390, 360	1.28
Case C1	1.0	0.5	1.0	188 x 51 x 60	1320, 390, 360	1.28
Case C2	1.0	1.0	1.0	188 x 51 x 60	1320, 390, 360	1.28
Case C3	1.0	1.5	1.0	188 x 51 x 75	1320, 390, 540	1.28
Case C4	1.0	2.0	1.0	188 x 51 x 93	1320, 390, 720	1.28

建築物高度的風速 $U_H = 10 \text{ m/s}$

資料來源：本研究整理

表 4-8. 系列 C 的模擬結果 (開口高度 $z = 0.75H_b$)

	C_{p1}	C_{p2}	$\Delta P \text{ (Pa)}$	$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$	Q^*	$Q^* / Q_o^* (\%)$
Case A	0.943	-0.427	82.24	5.38	0.54	100.0
Case C1	0.660	-0.217	52.67	4.30	0.43	80.0
Case C2	0.056	-0.241	17.98	2.50	0.25	46.5
Case C3	-0.077	-0.298	13.29	2.16	0.22	40.1
Case C4	-0.235	-0.290	3.31	1.08	0.11	20.0

Q_s^* 為單棟建築物的無因次流量 (Case A)

資料來源：本研究整理

表 4-9. 系列 D 的參數

	S/H_b	H_u/H_b	W_u/W_b	Grid number ($\Delta X \times \Delta Y \times \Delta Z$)	Domain size L, W, H (m)	Br (%)
Case A	-	-	-	169 x 51 x 60	1230, 390, 360	1.28
Case D1	1.0	1.0	0.5	188 x 51 x 60	1320, 390, 360	1.28
Case D2	1.0	1.0	1.0	188 x 51 x 60	1320, 390, 360	1.28
Case D3	1.0	1.0	1.5	188 x 72 x 60	1320, 390, 540	1.92
Case D4	1.0	1.0	2.0	188 x 75 x 60	1320, 390, 720	2.56

建築物高度的風速 $U_H = 10 \text{ m/s}$

資料來源：本研究整理

表 4-10. 系列 D 的模擬結果. (開口高度 $z = 0.75H_b$)

	C_{p1}	C_{p2}	$\Delta P \text{ (Pa)}$	$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	Q^*	$Q^* / Q_0^* (\%)$
Case A	0.943	-0.427	82.24	5.38	0.54	100.0
Case D1	0.339	-0.278	37.07	3.61	0.36	67.1
Case D2	0.056	-0.241	17.98	2.50	0.25	46.5
Case D3	-0.330	-0.156	10.44	1.92	0.19	35.6
Case D4	-0.459	-0.188	16.30	2.39	0.24	44.4

Q_s^* 為單棟建築物的無因次流量 (Case A)

資料來源：本研究整理

第五章 結論與建議

第一節 結論

本年度計畫主要有兩部分的研究成果，以下做一說明。

壹、建築物表面風壓係數之風洞試驗

本研究利用建築研究所風雨風洞實驗室的多頻道壓力掃描計量測L型、門型等建築物縮尺模型的表面風壓係數，並利用中央大學的大型風洞實驗量測單棟及雙棟矩形建築物的表面風壓係數。實驗數據可用於計算探討集合式住宅對建築物自然通風的影響，及建築物在其他建築物的遮蔽下之風壓通風，風洞實驗量測數據亦可驗證數值模式的計算結果。實驗結果發現建築物的表面風壓係數會隨建築物的幾何外型不同而有所不同。

貳、建築物表面風壓係數之數值模擬

本計畫利用計算流體動力學(CFD)模式探討矩形建築物在上風建築物的遮蔽效應下之表面風壓係數。數值模式的風壓係數與風洞實驗量測值結果互相比對，發現大渦模式(LES)模擬的結果與風洞實驗所量測值相當吻合，其誤差在合理的範圍內。但 $k-\epsilon$ 模式的模擬結果較差。因此，大渦模式的結果是可以模擬建築物表面風壓及風壓驅動之自然通風量。然後本研究利用大渦模式來進行了一系列的數值模擬，計算下風建築物受相鄰建築遮蔽效應的通風量，評估建築物之間的間距、上風建築物高度和寬度的影響。研究結果發現：

- (1) 單棟建築物的深度變大時，風力驅動的貫流通風量會因為背風面的風壓變大，而導致通風量變小約20%，當建築物深度 $L_b/H_i \geq 4.0$ 時，建築物的通風量就不再下降。
- (2) 兩棟相同高度、寬度的建築物之間的間距小於4倍的建築物高度，下風建築物受到遮蔽效應，貫流通風量將顯著的減少。
- (3) 當上風建築物的高度 $H_u \geq 1.5H_b$ 和寬度 $W_u \geq 1.5W_b$ 時，背風面壓力係數會高於迎風面的壓力係數，會產生逆向通風的現象。因此，大渦模式的數值模擬

是可以模擬實驗情況進行探討。

(4) 單棟建築物的寬度變寬一倍時，對貫流通風量的影響並不顯著。

第二節 建議

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

建議一

研究住宅建築物採用自然通風及機械通風所消耗的電力能源：立即可行的建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

本計畫後僅考慮集合式住宅建築物的自然風壓通風量，及周遭建築物對主建築物風壓通風的影響，但並無評估自然通風對建築節能量，未來可利用本研究的成果評估採用自然通風及機械通風的建築物所使用的能源及節能的效果，並與實際建築物所使用的電力能源比較。此研究可讓自然通風在台灣地區有更好的發展，更廣泛地應用在台灣地區各種建築物的通風設計。

建議二

調查各種建築物使用自然通風的概況：長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營建署、行政院公共工程委員會

調查台灣各種建築物，譬如住宅、學校、宿舍及辦公大樓等建築在不同的季節、溫濕度狀況下，使用自然通風的概況及所耗費的電力能源。後續的研究可提升自然通風在台灣建築界的使用率，讓綠建築真正地在台灣落實，創造舒適的室內環境，並減少建築物所消耗的能源。

附錄一 期初審查會議記錄與回應

內政部建築研究所 101 年度研究計畫「集合式住宅對建築物自然通風的影響」期末審查會議紀錄

- 一、日期：101 年 2 月 17 日（星期五）上午 9 時 30 分
 二、地點：大坪林聯合辦公大樓 15 樓第一會議室
 三、主持人：林建宏 組長
 四、記錄：劉文欽、黎益肇

審查意見回應對照表

審查委員	審查意見	回應
謝俊民教授	1. 建蔽率/容積率與實驗之集合式住宅簡述。 2. 自然通風使用時機文獻整理。	1. 因為建蔽率/容積率的計算需要用到建築物基地面積，本研究並不需計算建蔽率/容積率。 2. 計畫報告書會整理自然通風的使用時機。
蕭葆義教授	1. 研究擬對國內常見之集合式住宅的建築物外型，包括矩型、L 型、冂型及開口型等。未來實驗之工作是否四種外型皆要進行，亦或選取其中數種外型，建議明確說明。	1. 本計畫預備探討四種建築物外型(矩型、L 型、冂型及開口型)的自然通風。
鄭啟明教授	1. 本計畫案對於建築物自然通風具有相當重要性，研究結果對於 TAIVENT 的進一步發展很有意義。 2. 本案量測建築物之表面風壓以評估自然通風量是否只要使用平均風壓係數，擾動風壓至對於自然通風有影響。 3. 集合式住宅多為高層	1. 謝謝肯定。 2. 風壓貫流通風僅需要用到建築物的表面風壓，不需要擾動風壓。 3. 本研究預備探討都會地區的高層建築通風，故風洞實驗的來流的速度剖面、紊流強度等皆須符合都會地區的風場特性。

審查委員	審查意見	回應
	建築，此類建築物之自然通風是否受到速度梯度、紊流強度、紊流尺度等邊界層流場特性的影響。	
方富民教授	1. 風洞試驗中之來流風況為何？若是邊界層來流，δ/H之選擇為何？ 2. 請說明如何將風洞試驗之結果。	1. 風洞實驗中來流的速度剖面、紊流強度等皆須符合都會地區的風場特性。 2. 風洞實驗量得之風壓係數將可用於計算風壓通風量。
厲妮妮研究員	1. 關於本企畫書所提到之研究方法，建議在詳加補充，如間距變化的種類、座標選擇的種類、模型長寬比例等。 2. 關於企畫書的 19 頁的甘特圖，建議加入期中報告及期末報告之項目。 3. 本案招標文件及招標金額（採固定金額）係以研究人員 4 人（本所人員除外）列之。然貴廠商提列研究人員名單僅列 3 人，請說明原因。	1. 本研究模型縮尺比為 100，預備探討之流況將在報告書中註明。 2. 企畫書 19 頁的甘特圖，建議加入期中報告及期末報告之項目。 3. 研究人員少列一人，將以代聘方式列入。
郭建源研究員	1. 企畫書第 10 頁提到以皮托管量測建築物模型開口處之風速與通風量，以皮托管進行量測是否合宜？請考量。 2. 本研究案是否納入台灣的氣象資料？如有是以何都會區為主？同時氣象資料室內建於程式中或使用者在自行納入。	1. 貫流通風因為流向一致，可以用皮托管在開口處量測風速不同位置的方式來計算通風量。當開口處流向不一致時，不宜使用皮托管。 2. 台灣的氣象資料已在之前的研究案中分析整理，加入到 TAIVENT 模式中，故今年度的計畫不需再使用台灣的氣象資料。
林建宏組	1. 本案研究企畫書僅列研究助理 2 人，與招標文件所列 4	1. 研究人員少列一人，

審查委員	審查意見	回應
長	人未符。請說明。 2. 研究成果納入 TAIVENT 修正後，建議交付建築師進行實務操作，以驗證系統接受度並徵詢回饋意見。	將以代聘方式列入。 2. TAIVENT 修正後，將交由建築師進行實務操作、測試。

附錄二 期中審查會議記錄與回應

內政部建築研究所 101 年度研究計畫「集合式住宅對建築物自然通風的影響」期中審查會議紀錄

- 一、日期：101 年 7 月 27 日（星期五）上午 9 時 30 分
二、地點：大坪林聯合辦公大樓 13 樓第一會議室
三、主持人：鄭主任秘書元良
四、記錄：劉文欽、黎益肇

審查意見回應對照表

審查委員	審查意見	回應
陳技師亦信	- 圖 2.1 應說明貫流通風與單側通風，而該圖僅說明貫流通風之狀況。 - 第 9 頁第三節研究文獻之位置錯置，並請注意報告書中符號有漏頁情形。 - 建築物之前後有無開口，是否會影響 C_p 值(例如前後單面有開口)? 或由於大樓分戶因素，僅正面及側面之牆面有開口時，其影響為何? 又如何評估通風量? - 是否能評估高度、寬度改變對於上下游建築物通風之影響? - 研究成果可否藉由耐風規範之外牆設計風壓評估，據以評估通風量。	- 期末報告會依照審查意見修改。 - 期中報告書誤植部分將會在期末報告中修正。 - 建築物開口面積不大時，不會影響 C_p 值。通風模式可計算側面之牆面有開口之通風量。 - 本研究藉由控制高度，改變寬度或控制寬度，改變高度來探討高度及寬度對通風的影響，若同時改變高度與寬度則有太多的組合。 - 耐風規範中的外牆風壓皆為單棟建築物，無鄰棟影響之風壓，故無法評估受鄰棟影響之通風。
蕭教授葆義	- 數值模擬有諸多不同建築大小及間距案例，並以部分實驗結果比較，研究成果良好。期望於期末報告中加入更多案例，並進行系統化探討。 - 本案風洞試驗的邊界層幕數律 α 為 0.2，而厚度為 150 m 是否過小?	- 期末報告將會整理不同案例之結果，進行系統化分析。 - 邊界層厚度是配合建築模型縮尺比，實驗結果皆是以建築物高度

審查委員	審查意見	回應
		處之風速 U_H 無因次化，故邊界層厚度對結果的影響不大。
鄭教授啟明	1. 本研究影響參數複雜，計劃以風洞實驗與數值模擬同步進行以相互驗證，過程頗為嚴謹。 2. 風洞實驗與數值模擬的比較，似乎以迎風面及背風面中心線壓力為主，並以此做為通風量估算的依據，本方法所估算之通風量準確性如何？ 3. 數值模擬之來流流場特性為何？請於期末報告中詳列。 4. 集合住宅的參數極多，要得到具體可用成果研究量相當大。倘若本研究以平均風壓為估算通風量之主要參數，建議使用 $k-\varepsilon$ 模式，會有利於後續大量研究。	1. 感謝委員肯定。 2. 本研究僅比較迎、背風面中心線壓力，有與國外其他學者的結果比對、驗證模式的準確性。 3. 數值模式的入流邊界條件的設定依據風洞實驗的來流流場特性，這會在期末報告中詳列。 4. $k-\varepsilon$ 模式的準確性較差，本研究將使用 LES 模式。
胡總監銘煌	1. 本計劃預結合風洞試驗與自然通風模式 TAIVENT 探討集合住宅(如長條型，L 型等)的風壓通風特性，是否包括建物內部隔間之影響？ 2. 目前期中報告已完成之研究項目乃以矩形建物為對象，而其它形狀建物如何引用本研究成果？ 3. 本報告中引用許多文獻，請在本文及參考書目之間能正確對應，以便於了解。 4. 第 3 頁有倒數第 9 行「風洞實驗將在 2011 年 7 月...」及第 15 頁「示意圖」與本文衝突等錯誤，請更正。	1. TAIVENT 通風模式可計算各種室內隔間的通風量。 2. 本研究以矩形建築物為主，亦將探討 L 型，Γ 型等)建築物的風壓及通風。 3. 期末報告將會整理參考文獻之對應關係。 4. 期中報告書誤植部分將會在期末報告中修正。

審查委員	審查意見	回應
江 建築師 星仁	1. 部分示意圖表達不清楚，請修正。 2. 第 16 頁文中描述跳過圖 3.2，煩請修正。 3. 第 19 頁圖 3.2 及 3.3 為實驗配置照片於圖說，照片顯示配置無法與圖說相對應。	1. 會在期末報告中修正。 2. 圖 3.2 會在期末報告中說明。 3. 期中報告書誤植部分將會在期末報告中修正。
林組長 建宏	1. 集合式住宅種類型態繁多，如何界定？ 2. 如何將 TAIVENT 模式導入本研究？而模式的精準度與操作性又如何？	1. 集合式住宅一般指密集興建的公寓、高層住宅大樓等。 2. 本研究得之建築物外牆風壓可代入 TAIVENT 模式求得通風量。前兩年的研究有用示蹤劑量測建築物模型的通風量，並與國外其他學者的通風公式比對，研究結果驗證 TAIVENT 模式的正確性。
鄭主任秘書 元良	1. 自然通風主要影響因素為何？將如何評估？ 2. 本研究是否可應用至住宅配置以降低熱島效應？並與實際實務應用如何連結？	1. 自然通風依其驅動力可分為風壓通風與浮力通風，影響因素包括室外風速、室內外溫差、建築物開口位置、室內隔間等。前兩年的研究計畫皆有對以上參數進行研究。 2. 建築物配置會影響室外風場及鄰近地區的熱島效應，本研究未探討熱島效應，但研究成果可應用於熱島效應。

附錄三 期末審查會議記錄與回應

內政部建築研究所 101 年度研究計畫「集合式住宅對建築物自然通風的影響」期末審查會議紀錄

- 一、日期：101 年 11 月 2 日（星期五）上午 9 時 30 分
- 二、地點：大坪林聯合辦公大樓 15 樓第三會議室
- 三、主持人：鄭主任秘書元良
- 四、記錄：陳玠佑、李信宏、劉介元

審查意見回應對照表

審查委員	審查意見	回應
中華民國全國結構技師公會 陳技師正平	1. 自然通風量常因氣候因素而顯現效果不穩定，應以機械通風為主。 2. 自然通風因低樓層受地面交通工具、環境衛生及灰塵等因素影響並不適用，而高樓層則影響較小。 3. L 及 U 型建築物對結構系統而言屬不規則，較不適合。故應宜以其他形狀代替。	1. 機械通風會耗費能源，適合大型公共建築。住宅適合使用自然通風，可節約能源。 2. 高、低樓層建築物皆可使用自然通風，視風速、風向、建築物周遭環境而定。 3. 台灣有許多 L 及 U 型建築物等不規則外形的建築物。
鄭教授啟明	1. 本計畫以風洞試驗及數值計算求得受上游建築物影響的集合建築物表面風壓，進一步評估其自然通風研究內容豐富符合預期成果。 2. 請於報告中補充 U 形及 L 形建築相關幾何外形之參數。 3. 請補充說明數值模擬時，逼近流場之模擬結果。 4. 集合式住宅的影響參數變化繁多，很難逐一執行風洞試驗或 LES 數值模擬。建議嘗試在可接受的準確度下，以較少量的網	1. 感謝委員肯定。 2. U 型、L 型建築物模型風洞實驗結果會在期末報告中補充說明。 3. 數值模式的入流處的逼近流場會在成果報告中詳述。 4. 標準 $k - \epsilon$ 模式的準確性較差，RNG $k - \epsilon$ 模式的準確性較佳，

審查委員	審查意見	回應
	格，例如 $k-\varepsilon$ 紊流模式求得表面風壓，進而評估自然通風。	LES 模式最佳。若為節省計算時間，可採用 RNG $k-\varepsilon$ 模式。
胡總監銘煌	1. 請補充說明門形與 L 形建築物模型風洞與矩形建築物實驗結果之差異。 2. 請於結論中補充符號及簡圖說明，使其可應用於工程實務上。	1. 門型、L 型建築物的風洞實驗結果已補於成果報告中 P.25 頁之內文及圖 3-9 至圖 3-22。 2. 成果報告的結論與建議將會修正，符號表如附錄四（P.81）。
謝教授俊民	1. 風洞試驗與 CFD 計算驗證比對具有研究價值，資料庫未來需長期間建構。 2. 除通風量 Q 外，亦可將模擬求得之風速評估舒適性。 3. 可於未來研究中比較高樓層與低樓層之自然通風。 4. 如何應用至多棟社區開發大樓之分析？	1. 感謝委員肯定。 2. 本研究主要探討通風量，由通風量可計算入口處風速、室內溫度及人體舒適度。 3. 本研究所發展之通風模式可適用高、低層建築物。 4. 謝謝委員的建議，未來的研究可考慮多棟建築物密集排列下的通風。
中華民國全國建築師公會江建築師星仁	1. 報告書中 P.16, 文內並無對圖 2-3 之描述。 2. 報告書中 P.20, 圖 3-5 需修正	1. 圖 2-3 之說明已在成果報告內文中描述(P.16)。 2. 圖 3-5 會在成果報告中修正(P.20)。

審查委員	審查意見	回應
苗教授君易	1. 入口流場(邊界層特性)對建築物流場的影響請補充說明。 2. 請補充說明上游紊流效應對建築物流場、壓力分布及壓力擾動特性的影響。 3. 請補充實驗流場結果(文獻)與CFD 結果之比較過程中，兩者參數(例如：雷諾數、邊界層厚度等)之符合程度。	1. 入流流場為紊流邊界層流，會在成果報告中詳述。 2. 上游的紊流對建築物迎風面壓力影響不大，但會影響建築物背風面壓力，此部分會在成果報告中詳述(P.21、圖 3-7 及圖 3-8)。 3. 成果報告中會補上實驗與 CFD 的雷諾數、邊界層厚度等參數(P.38)。
陳委員瑞華	1. 建議於結論中將所用之符號附加說明。 2. 如何將本案應用於較大建築群之通風研究？	1. 成果報告的定稿會補上符號表。 2. 模擬較大的建築群時，計算域要加大，計算時間會更費時。風洞實驗的模型要變小，方滿足模型阻滯比不得大於 5%之限制。
陳組長建忠	1. 報告書建議多以圖表方式呈現，使讀者更容易了解研究內容。 2. 室內的幾何形狀不同是否會影響通風？ 3. 可將不同幾何外型之實驗內容相互比較，並以專章撰寫。	1. 門型、L 型建築物的風洞實驗結果以補於成果報告中 P.25 頁之內文及圖 3-9 至圖 3-22。 2. 建築物室內隔間會影響通風，此問題在前兩年的計畫中有探討。
鄭主任秘書 元良	1. 本案如何應用於現場設計，建議予以補述，供設計者及相關公會參考，使本案更有貢獻。	1. 報告書中的建議會在成果報告最後定稿中結論的部分(P.69)修正。

附錄四 符號表

A_1 (m^2)	:	迎風面開口面積
A_2 (m^2)	:	背風面開口面積
A_{21}	:	開口面積比
ACH (hr^{-1})	:	換氣率
A_r	:	阿基米德數
Br	:	阻滯比
C_d	:	流量係數(discharge coefficient)
C_p	:	平均風壓係數
C_{p1}	:	迎風面平均風壓係數
C_{p2}	:	背風面平均風壓係數
$Cr=u\Delta t/\Delta x$		可蘭數(Courant number)
C_s		Smagorinsky 常數
D (cm)	:	模型長度
g	:	重力加速度
H (cm)	:	模型高度
H_d (m)	:	計算域高度
H_b (m)	:	建築物高度
H_u (m)	:	上風建築物高度
Iu		紊流強度
k (m^2/s^2)	:	紊流動能
L_d (m)	:	計算域長度
L_b (m)	:	建築物長度
P (Pa)	:	建築物表面壓力
P_o (Pa)	:	參考壓力
Q (m^3/s)	:	通風量
Q_s (m^3/s)	:	單棟建築物通風量
Q^*	:	無因次化通風量
Re	:	雷諾數

S	:	兩棟建築物間距
$S^* = S/H_b$	:	無因次化建築物間距
S_{ij}		應變率
U (m/s)	:	室外風速
U_o (m/s)	:	自由流的風速
U_H (m/s)	:	建築物高度處風速
$U(z)$ (m/s)	:	高度 z 處之風速
W_d (m)	:	計算域寬度
W_b (m)	:	建築物寬度
W_u (m)	:	上風建築物寬度
x/H_b	:	開口處無因次長度
y/H_b	:	開口處無因次寬度
z/H_b	:	開口處無因次高度
α	:	地況指數
μ_t	:	次網格紊流黏滯係數
δ (m)	:	邊界層厚度
ε	:	動能消散率
$\forall$ (m ³)	:	建築物室內空間的體積
κ	:	馮卡門常數
θ (deg.)	:	風向角
ρ (kg/m ³)	:	空氣密度
ζ_i (m ⁻⁴)	:	室內阻抗因子

參考書目：

1. 江哲銘 (1997) 《**建築物理**》，三民書局印行，台北市，p.89-94。
2. 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。
3. 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。
4. 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
5. 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
6. 朱佳仁 (2006) 《**風工程概論**》，科技圖書出版公司印行，台北市，p.204-208。
7. 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
8. 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.
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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.
14. 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.
15. Allard F. and Santamouris M. **Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook**, James and James Ltd.; 1998.
16. Allocca C. Chen, Q. and Glicksman LR. Design analysis of single-sided natural ventilation, **Energy and Buildings** 2003: 35 (8): 785-795.
17. Awbi HB. **Ventilation of Buildings**, 2nd ed., Taylor and Francis; 2003, p.522.

18. Bauman FS. Ernest DR. Arens EA. The effects of surrounding buildings on wind pressure distribution and natural ventilation in long building rows, *ASHRAE Transactions* 1988; 99 (2): 1670-1695.
19. Blocken B. Stathopoulos T. and Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problem, *Atmospheric Environment* 2007; 41: 238-252.
20. Chang CH. and Meroney RN. The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2003; 91: 1039-1050.
21. Chang WR. Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building, *Building and Environment* 2006; 41: 549-556.
22. Chen Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment* 2009; 44: 848-858.
23. Chiu YH and Etheridge DW. External flow effects on the discharge coefficients of two types of ventilation opening, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2007; 95: 225-252.
24. Chu CR. Chiu YH. Chen YJ. Wang YW. and Chou CP. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross ventilation, *Building and Environment* 2009; 44: 2064-2072.
25. Chu CR. and Wang YW. The loss factors of building openings for wind-driven ventilation. *Building and Environment* 2010; 45(10): 2273-2279.
26. Chu CR, Chen RH. and Chen JW. A laboratory experiment of shear-induced ventilation. *Energy and Buildings* 2011; 43 (10): 2631-2637.
27. Evola G. and Popov V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings, *Energy and Building* 2006; 38: 491-501.
28. Gao NP. Niu JL. Perino M. and Heiselberg P. The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: Tracer gas simulation. *Building and Environment* 2008; 43: 1805-1817.
29. Hu C-H. Ohba M. and Yoshie R. CFD modeling of unsteady cross ventilation flows using LES. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 2008; 96: 1692-1706.
30. Linden PF. The Fluid Mechanics of Natural Ventilation, *Annual Review of Fluid Mechanics* 1999; 31: 201-238.
31. Karava P. Stathopoulos T, and Athienitis AK. Airflow assessment in cross-ventilated

- buildings with operable façade elements, *Building and Environment*, 2011; 46(1): 266-279.
32. Kim T, Kim K, and Kim BS. A wind tunnel experiment and CFD analysis on airflow performance of enclosed-arcade markets in Korea, *Building and Environment* 2010; 45 (5): 1329-1338.
33. Kurabuchi T, Ohba M, Endo T, Akamine Y, and Nakayama F. Local dynamic similarity model of cross- ventilation, Part 1: Theoretical framework, *International Journal of Ventilation* 2004; 2 (4): 371-382.
34. 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, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001; 89: 1513-1524.
35. Ramponi R. and Blocken B. CFD simulation of cross ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters, *Building and Environment* 2012; 53: 34-48.
36. Roulet C.-A. *Ventilation and Airflow in Buildings*, Earthscan; 2008, p.39-42.
37. Santamouris M. and Wouters P. *Building Ventilation: The State of the Art*, Earthscan; 2006.
38. Tominaga Y. Mochida A. Yoshie R. Kataoka H. Nozu T. Masaru Y. and Shirasawa T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2008; 96: 1749-1761.
39. Tung C. Shih YC. Hu SC. and Chang YL. Experimental performance investigation of ventilation schemes in a private bathroom. *Building and Environment* 2010; 45 (1): 243-251.

集合式住宅對建築物自然通風的影響

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：陳瑞鈴、朱佳仁、劉文欽、陳玠佑、姜柏帆、李勝雄

出版年月：101 年 12 月

版次：第一版

ISBN：978-986-03-4476-9 (平裝)

ISBN : 978-986-03-4476-9 (平裝)