

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

內政部建築研究所協同研究報告

111

年度

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 111 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)

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

研究主持人：王安強

協同主持人：陳若華

研究員：羅元隆、蔡宜中、楊致嘉、郭建源

研究助理：鍾政洋、陳正瑋

研究期程：中華民國 111 年 3 月至 111 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 111 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.....	V
摘要.....	XIII
第一章 緒 論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究內容與方法.....	5
第三節 研究流程與進度規劃.....	6
第二章 文獻回顧.....	9
第一節 關於建築物多孔性外牆等壓特性的研究	9
第二節 關於建築物多孔性外牆的耐風設計研究	11
第三節 多孔性外牆對高層建築風致振動影響研究	15
第四節 極值分析理論於風工程中設計氣動力參數推估	16
第五節 耐風設計規範中有關外牆設計風荷載	24
第三章 研究方法.....	31
第一節 氣動力實驗規劃.....	31

第二節 資料分析	39
第四章 研究成果與檢討.....	43
第一節 第一階段氣動力實驗.....	43
第二節 第一階段氣動力實驗成果小結	70
第三節 第二階段氣動力實驗.....	71
第四節 計算範例	97
第五章 結論與建議.....	111
第一節 結論	111
第二節 建議	113
附錄一 評選委員意見及廠商回應一覽表	115
附錄二 期中報告審查會委員意見及廠商回應一覽表	119
附錄三 專家座談委員意見及廠商回應一覽表	125
附錄四 期末審查會議委員意見及廠商回應一覽表	135
參考書目	145

表次

表 1-1 研究進度規劃表	7
表 2-1 耐風設計規範中有關外牆設計風荷載相關名詞彙整	27
表 2-2 我國建築物耐風設計規範建議之建築物局部構材及外部 被覆物之外風壓係數(GCp)係數	28
表 2-3 我國建築物耐風設計規範建議之內風壓係數	29
表 3-1 第一階段氣動力實驗模型縮尺說明	32
表 3-2 第二階段氣動力實驗模型縮尺說明	37
表 4-1 多孔性外牆背風面設計風壓迴歸計算成果	92
表 4-2 多孔性外牆背風面設計風壓係數建議值	96
表 4-3 建築物資料與工址風環境	100
表 4-4 多孔性外牆外風壓係數	105
表 4-5 AB 多孔性外牆單元與繫件之設計風壓 kgf / m^2	106
表 4-6 各牆面多孔性外牆單元與繫件之最大設計正負風壓 $\text{kgf} /$ m^2	107
表 4-7 本研究建議係數計算結果與耐風規範個內風壓係數計算 結果比較	109
表 A-1 評選意見及廠商回應一覽表	115

表 A-2 期中報告審查會委員意見及廠商回應一覽表	119
表 A-3 專家座談委員意見及廠商回應一覽表	125
表 A-3 期末審查會議委員意見及廠商回應一覽表	135

圖次

圖 1-1 建築物多孔性外牆設計(a)雙層幕牆，(b)沖孔板外牆	2
圖 1-2 具有智慧化皮層之 AI Bahr Towers 建築物.....	2
圖 1-3.建築物外觀之格柵式構造及遮陽板案例	4
圖 1-4 計畫執行流程	6
圖 2-1 具有單面多孔性外牆建築模型，可變化更換外牆以變化牆 間距、側邊開放性及開孔率.....	12
圖 2-2 具有單面多孔性外牆建築模型，中央高度處平均風壓係 數分布情形(a)固定開孔率 2.4%時，內外表面風壓分布受牆間 距之影響，(b)固定牆間距 2cm 時，內外表面風壓分布受開孔 率之影響。	12
圖 2-3 具有四面多孔性外牆建築模型，可變化更換外牆以變化牆 間距、側邊開放性及開孔率.....	13
圖 2-4 風攻角 0 度、夾層間距 2cm、不同孔隙率對中間高度帶 狀區域之內外風壓係數及淨風壓係數之影響(a)四面夾層不連 通， (b) 四面夾層相互連通。	14
圖 2-5 極值風速與極值風壓係數的聯合機率密度分布圖	18
圖 2-6 $c-v$ 平面聯合機率密度等高線分布圖($\tau v = 0$ 、 $\tau c = 0$)	21

圖 2-7 $c-v$ 平面風載重估算值等高線分布圖($\tau v = 0$ 、 $\tau c = 0$)	21
圖 2-8 甘保法主要分析流程	23
圖 3-1 風洞實驗流場剖面圖 (a)平均風速剖面 (b)紊流強度剖面 (c)積分尺度剖面	32
圖 3-2 第一階段風洞實驗模型 (a)模型 A (b)模型 B	33
圖 3-2 第一階段風洞實驗模型，(a)模型 A (b)模型 B，(c)風壓量 測位置定義，(d)風攻角與座標定義	34
圖 3-3 風洞實驗格柵端板流場架設圖（示意圖右側為來流方向） (a)示意等角視圖 (b)示意側視圖 (c)實際架設情形	35
圖 3-4 第二階段風洞實驗流場剖面圖 (a)平均風速剖面 (b)紊流 強度剖面 (c)積分尺度剖面	36
圖 3-5 第二階段多孔性外牆與建築物搭配之模型設計，(a)夾層 內部構造，(b)模型外觀示意圖，(c)風攻角定義	37
圖 3-6 第二階段實驗架設情形 (a)風攻角 45 度開孔率 15% (b)風攻角 0 度開孔率 32% (c)風攻角 30 度開孔率 60%	38
圖 4-1 第一階段氣動力實驗，(a)模型 A，(b)模型 B，(c)風攻角 定義	44
圖 4-2 第一階段氣動力實驗，(a)模型 A 風壓量測位置，(b)模型 B 風壓量測位置	44

- 圖 4-3 模型 B，開孔率 64%，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆背面尖峰風壓值(sur)及內部建物表面尖峰風壓值(int)分布情形，風攻角(a)0 度，(b)90 度，(c)180 度，(d)270 度。46
- 圖 4-4 模型 B，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆背面尖峰風壓值(sur)及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)90 度，(c)180 度，(d)270 度。48
- 圖 4-5 模型 B，相鄰夾層空間連通，多孔性外牆背面尖峰風壓值(sur)及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)90 度，(c)180 度，(d)270 度。49
- 圖 4-6 風攻角 0 度，多孔性外牆外部(ext)、背面(int)及內部建物表面(IW)於中間高度帶寬之平均風壓係數分布情形，相鄰夾層空間(a)不連通，(b)連通。52
- 圖 4-7 多孔性外牆外部(ext)、背面(int)於中間高度帶寬之平均風壓係數分布情形，相鄰夾層空間連通，風攻角(a) 0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。54
- 圖 4-8 四面向平均風壓係數分布，風攻角零度，外牆淨風壓(net)及內牆(IW)風壓平均風壓係數，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通.....55
- 圖 4-9 四面向平均風壓係數分布，風攻角 45 度，四面夾層相互連通，平均風壓係數包括外牆外風壓(ext)、背風壓(int)及內

牆(IW)風壓，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通	56
圖 4-10 四面向，外牆外風壓(ext) 及內風壓(int)尖峰風壓係數 分布，風攻角零度，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通	57
圖 4-11 四面向平均風壓係數分布，四面夾層相連通，多孔外牆 內外尖峰風壓係數差值與外牆尖峰淨風壓係數分布，風攻角 (a) 0 度，(b)45 度。	58
圖 4-12 模型 A，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆外部(ext)、背 面(sur)尖峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶 寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。	61
圖 4-13 模型 A，相鄰夾層空間連通，多孔性外牆外部(ext)、背 面(sur)尖峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶 寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。	62
圖 4-14 模型 A，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆淨風壓(net)尖 峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布 情形，風攻角(a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。	65
圖 4-15 模型 A，相鄰夾層空間連通，多孔性外牆淨風壓(net)尖 峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布 情形，風攻角(a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。	66

- 圖 4-16 風攻角 0 度時，中央高度，四面向多孔外牆對於內牆面風壓減抑情形，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通。68
- 圖 4-17 模型 A，風攻角 0 度時，相鄰夾層不連通，模型側風面二分之一高度，中央區域之風壓頻譜，開孔率 (a)16%，(b)32%，(c)64%，(d)0%。.....69
- 圖 4-18 模型 A，風攻角 0 度時，相鄰夾層不連通，模型側風面二分之一高度，中央區域之風壓頻譜，開孔率 (a)16%，(b)32%，(c)64%，(d)0%。.....69
- 圖 4-19 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆內外平均風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔 (a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。.....74
- 圖 4-20 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外風壓平均風壓係數及淨風壓平均風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。.....75
- 圖 4-21 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆背面風壓平均風壓係數及內部建物立面風壓平均風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。.....76
- 圖 4-22 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆內外尖峰風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔

(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	77
圖 4-23 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外部 尖峰風壓係數及淨風壓尖峰風壓係數於中央高度帶寬之分布 情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	78
圖 4-24 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外部 尖峰風壓係數及內部建物立面風壓尖峰風壓係數於中央高度 帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	79
圖 4-25 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆內 外之平均風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔 (a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	82
圖 4-26 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外 風壓與淨風壓之平均風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾 層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	83
圖 4-27 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外 風壓與內部建物立面風壓平均風壓係數於中央高度帶寬分布 情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	84
圖 4-28 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆內 外之尖峰風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔 (a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。	85

- 圖 4-29 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與淨風壓之尖峰值於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔 (a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。.....86
- 圖 4-30 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓之尖峰風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。.....87
- 圖 4-31 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓之擾動性風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。.....89
- 圖 4-32 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓之擾動性風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。..90
- 圖 4-32 風攻角 0 度，迎風面中央區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通.....93
- 圖 4-33 風攻角 0 度，迎風面角隅區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通.....94
- 圖 4-34 風攻角 0 度，側風面中央區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通.....94
- 圖 4-35 風攻角 0 度，側風面角隅區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通.....95

圖 4-36	高度超過 18 公尺之多孔性外牆耐風設計流程圖	98
圖 4-37	不同高度之風速壓與外牆背風壓係數計算流程圖	99
圖 4-38	多孔性外牆單元與繫件位置示意圖	107
圖 4-39	規範圖 3.2 外牆分區示意圖(參考規範分區設計風壓).	108

摘要

關鍵詞：建築多孔性外牆風荷載，風洞實驗，極值分析

一、研究緣起

隨著建築物多孔性外牆更加複雜多變的發展，基於台灣地區每年都有劇烈的颱風等極端氣候來襲考慮，諸如此類多孔性外牆的耐風設計成為亟需解決的問題。另一方面，多孔性外牆對於減輕建築物外牆風壓擾動的潛力甚大，除對於建築物的外觀有裝飾作用，亦有可能產生保護建築物表面構件的作用。設計多孔性外牆所應考慮的風荷載，因其外型變化較大，不易由規範或文獻中獲得參考設計風壓係數。因此評估其減抑建築物外牆風壓擾動效用及多孔性外牆本身的設計風載重，有必要加以深入探討，以提供業界使用。

二、研究方法及過程

本研究利用風洞實驗更深入的探討建築物多孔性外牆所受到的風荷載狀況，包括內外表面風壓及其氣動力特性的討論，考慮不同安裝方式或內外風壓的差異成為風荷載的來源，因此間距、安裝位置、風向等多項因素均有影響，量測對象主要為風壓分布狀況，採用風洞進行縮尺模型氣動力實驗並搭配極值推估，掌握建築物多孔性外牆的整體受風特徵，並建議設計風壓係數。

三、重要發現

1. 外部風壓作用主要由建築物周邊流場與來流影響，對於多孔性外牆其上開孔狀況，未能達到改變建物周邊渦流形成與分布的程度，因此外部風壓特徵並未改變。
2. 風攻角的改變對於多孔性外牆內外各部的尖峰風壓係數分布有所影響，本階段實驗成果顯示，以風攻角 0 度時，各面向的尖峰風壓係數變化範圍較廣，因此可主要以 0 度風攻角的情形下進行設計風壓係數的推估。

3. 夾層相鄰空間不連通狀況下，多孔性外牆所受淨風壓平均風壓係數在本研究夾層間隔距離變化及不同開孔率條件下，平均值均接近零值，呈現接近內外等壓的狀態。
4. 夾層相鄰空間不連通時，多孔性外牆之外部尖峰風壓係數與內部建物立面風壓尖峰風壓係數兩者差異不大，內部建物立面風壓尖峰風壓係數略小於外牆之外部尖峰風壓係數約0.1~0.2，顯示多孔性外牆對內部建築物所受尖峰風壓作用較輕微。
5. 觀察多孔外牆的外風壓部分，迎風面的正風壓值達到最高，而側風面的負值則最低，且兩者的絕對值接近，因此對於外風壓的考慮，迎風面及側風面風壓作用均應加以計算，正負兩種情形均須考慮。
6. 具備多孔性外牆及夾層間隔的方形斷面建物，四面夾層空間相互連通時，多孔性外牆淨風壓係數之尖峰值分布情形，類似於多孔性外牆背面尖峰風壓係數隨夾層間距而變化的趨勢，顯示外風壓係數主要由來流流場條件所影響，多孔性外牆背面風壓則受多孔性外牆設置條件(開孔率、夾層間隔)而變化，因此有相同的變化趨勢。
7. 具備多孔性外牆及夾層間隔的方形斷面建物，四面夾層空間相互連通時，多孔性外牆在迎風面及側風面上，淨風壓尖峰風壓係數的分布有中央區及角隅區的差別，以角隅區尖峰值較高，與多孔性外牆背面風壓分布有相同特徵。
8. 多孔性外牆不論其相鄰夾層是否連通，多孔性外牆對於減輕內部建築物立面風壓擾動均具有效果，其中開孔率較低的多孔性外牆其減輕的幅度較高。

四、建議事項：

【建議一】

建築物耐風設計規範與解說增加建築物多孔性外牆設計風壓係數及編製建築物多孔性外牆設計風荷載計算示範手冊：立即可行建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：結構技師公會

國內建築物耐風設計規範之設計風荷載計算方式對於建築規劃設計時之風荷載考量至關重要，目前規範對於外部被覆物風荷載已有建議之計算公式及係數，但對於外加具備高開孔率外牆的雙層外牆構型，其外牆應有的風荷載估算方式可加以補充。

建築物多孔性外牆設計風荷載依循目前我國「建築物耐風設計規範及解說」之外牆被覆物考慮方式，計算公式形式不變，仍採用外風壓減內風壓方式計算，其中外風壓係數採用目前外牆被覆物設計風壓係數，內風壓係數則使用本研究結果建議之背風面設計風壓係數。可增列於我國建築物耐風設計規範第 3.3 節，並於解說敘述中增加對於多孔性外牆設計風壓係數適用條件之說明。

結合規範條文之增訂，以實際建築案例尺寸、基地條件等具體資料，並在不同應用條件下如何選取參數做說明示範，建立計算示範手冊，有助於規範推廣利用。

【建議二】

建築物創新構型設計與風荷載計算技術開發：中長期建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：內政部營建署

建築技術、材料不斷的推陳出新，針對提升建築性能與節能永續等目標，創新構型及附屬構件的發展亦與日俱進，考慮台灣地區激烈氣候、強風作用等事件甚多，為確保不斷變化的建築新設計作

品之耐風性能，應有相應的安全建議與相關設計流程。

我國建築物耐風設計規範採用的基本風荷載條件隨環境變遷及工程研究的進步，應有同步的修正，並參考國外建築耐風設計規範發展，規範逐步擴充我國建築耐風設計規範適用的範圍。目前對於構形複雜或非傳統造型建築構造物，多需透過風洞實驗進行風荷載評估，可透過蒐集多年來累積的實驗成果，整理歸納選擇合適的成果參用引入於規範中，有助於提高建築物耐風設計規範的適用性。

ABSTRACT

Keywords: wind load on building porous exterior wall, wind tunnel experiment, extreme value analysis.

I. Background

With the more complex and changeable development of porous exterior walls of buildings, considering the extreme weather such as severe typhoons in Taiwan every year, the wind-resistant design of such porous exterior walls has become an urgent problem to be solved. On the other hand, the porous exterior wall has great potential to reduce the wind pressure disturbance on the exterior wall of the building. In addition to having a decorative effect on the appearance of the building, it may also protect the surface components of the building. The wind load that should be considered in the design of porous exterior walls is not easy to obtain the reference design wind pressure coefficient from the code or literature because of its large changes in appearance. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth study to evaluate the effect of reducing wind pressure disturbance on the external wall of the building and the design wind load of the porous external wall itself, so as to provide the industry for use.

II. Research methods and processes

This study uses wind tunnel experiments to further explore the wind load conditions on the porous exterior walls of buildings, including the discussion of internal and external surface wind pressure and its aerodynamic characteristics, considering different installation methods or differences in internal and external wind pressure as the source of wind load. Therefore, many factors such as spacing, installation position,

and wind direction have an impact. The measurement object is mainly the distribution of wind pressure. For further analysis, a wind tunnel is used to conduct aerodynamic experiments on a scaled model and combined with extreme value estimation, which can effectively grasp the porous structure of buildings. It is recommended to design the wind pressure coefficient and help clarify the suppression of wind pressure disturbance on the facade of the building by the porous outer wall of the building.

III. Preliminary Conclusions

1. The effect of external wind pressure is mainly affected by the flow field and incoming flow around the building. For the openings on the porous outer wall, the formation and distribution of eddy currents around the building cannot be changed, so the characteristics of external wind pressure have not changed. .
2. The change of the wind attack angle has an impact on the distribution of the peak wind pressure coefficient of each part inside and outside the porous outer wall. The experimental results at this stage show that when the wind attack angle is 0 degrees, the peak wind pressure coefficient of each face has a wide variation range. Therefore, the estimation of the design wind pressure coefficient can be carried out mainly in the case of 0 degree wind angle of attack.
3. Under the condition that the adjacent spaces of the interlayer are not connected, the average wind pressure coefficient of the net wind pressure on the porous outer wall is close to the zero value under the conditions of the interlayer interval distance and different opening ratios in this study, showing close to the inside and outside, etc. pressed state.
4. When the adjacent spaces of the mezzanine are not connected, there is little difference between the external peak wind pressure coefficient of the porous outer wall and the peak wind pressure

coefficient of the internal building facade, and the peak wind pressure coefficient of the internal building facade is slightly smaller than the external peak wind pressure coefficient. The external peak wind pressure coefficient of the wall is about 0.1~0.2, indicating that the effect of the porous external wall on the peak wind pressure of the internal building is relatively slight.

5. Observing the external wind pressure part of the porous outer wall, the positive wind pressure value on the windward side is the highest, while the negative value on the crosswind side is the lowest, and the absolute values of the two are close. Therefore, considering the external wind pressure, the windward side and The effect of wind pressure on the crosswind side should be calculated, and both positive and negative situations must be considered.
6. For a square-section building with porous exterior walls and interlayer intervals, when the interlayer spaces on the four sides are connected to each other, the peak value distribution of the net wind pressure coefficient of the porous exterior wall is similar to that of the peak wind pressure coefficient on the back of the porous exterior wall with the interlayer. The trend of changing with spacing shows that the external wind pressure coefficient is mainly affected by the flow field conditions of the incoming flow, and the wind pressure on the back of the porous external wall is changed by the setting conditions of the porous external wall (opening ratio, interlayer spacing), so there is the same Trend.
7. For a square-section building with porous outer walls and interlayer intervals, when the interlayer spaces on four sides are connected to each other, the porous outer walls are on the windward side and the crosswind side, and the distribution of the peak wind pressure coefficient of net wind pressure has the central area and the corners. The difference between the corner areas is that the peak value of the corner area is higher, which has the same characteristics as the wind pressure distribution on the back of the porous outer wall.

8. Porous exterior walls Regardless of whether their adjacent interlayers are connected, porous exterior walls are effective in alleviating wind pressure disturbances on the facade of internal buildings. Among them, porous exterior walls with lower porosity have a higher degree of mitigation.

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

一、研究緣起

建築外觀設計日新月異，林(2021)指出，建築師考慮建築物外觀設計時因素包括概念與主題、材質的變化、分割與比例、色彩張力、光與影、綠化立面等。因此近代建築物外殼造型不斷求新求變，並將建築物外殼設計與遮陽、節能、通風、裝飾、室內環境維護等需求進一步結合。科技與建築材料不斷的進步，建築外殼漸趨複雜化設計，包括基於節能與通風考量的雙層幕牆(Double skin facade)設計，如圖 1-1(a)所示，屬於單純平行雙層的設計。除玻璃幕牆的應用，商品化的產品尚有金屬擴張網、沖孔版等，如圖 1-1(b)所示。多孔性外牆使得建築物外觀有更豐富的變化，並對於室內採光控制、隔熱、防止強風擾動建築物表面構件等有所幫助。而後有更多創意造型上的變化，轉化為具備較大的厚度、較多的花紋、立體化等設計趨勢，突破傳統水平或垂直遮陽板的設計，有更富曲面變化的遮陽板立面設計產生。亦有採用結合太陽光電板的設計，不單是具有隔熱節能、防強風擾動等功能，兼備綠能的角色。近年智慧化設計技術的發展，更產生建築物智慧皮層的設計，透過對於環境的感知，自適應驅動調整建築物外殼皮層細部外型，達到環境友善的設計，如圖 1-2 所示。

隨著建築物多孔性外牆更加複雜多變的發展，基於台灣地區每年都有劇烈的颱風等極端氣候來襲考慮，諸如此類多孔性外牆的耐風設計成為亟需解決的問題。另一方面，多孔性外牆對於減輕建築物外牆風壓擾動的潛力甚大，除對於建築物的外觀有裝飾作用，亦

有可能產生保護建築物表面構件的作用。設計多孔性外牆所應考慮的風荷載，因其外型變化較大，不易由規範或文獻中獲得參考設計風壓係數。因此評估其減抑建築物外牆風壓擾動效用及多孔性外牆本身的設計風載重，有必要加以深入探討，以提供業界使用。

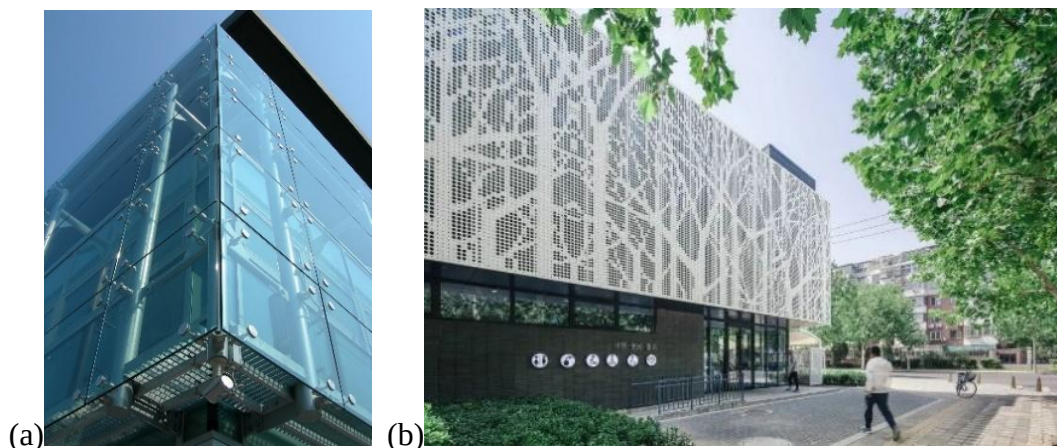


圖 1-1 建築物多孔性外牆設計(a)雙層幕牆，(b)沖孔板外牆

資料來源 (a) <https://en.nicolli.it/technology/facades/> (b) <https://forgemind.net/media>



圖 1-2 具有智慧化皮層之 AI Bahr Towers 建築物

資料來源 <https://www.ahr.co.uk/AI-Bahr-Towers>

二、研究背景

建築物為能適應環境條件或提供更佳的服務性能，常考慮到的功能如遮陽、通風、隔熱、太陽光電整合應用、減抑強風擾動、遮蔽設備等。因此多孔性外牆設計手法非常的多元，複合其他構件形成建築外皮層的設計是其中重要的手法，如格柵、遮陽板、雙層幕牆(Double-skin facade)、雨屏牆(Rain-screen wall)、沖孔板等均屬之，已

廣泛應用於建築物外牆設計。另外如貼附大樓外牆廣告物、施工架等在考慮其風荷載時亦具有相同氣動力行為。其共同的特徵為外殼層常與建築物使用空間之牆體(亦可稱之為內牆)間有空氣層形成空腔，外殼可能採用多孔隙設計，允許氣流於外部與空腔間流動，內牆則採氣密設計。依其氣動力特徵與設計採用的主要技術考量，可分類如下：

1.雙層外牆設計

- (1).**等壓兩屏牆**：利用多孔隙的外層牆造成雙牆間空腔內壓與外部風壓達到等壓的效果，而具有防止雨水滲漏進室內的效果。
- (2).**雙層幕牆**：雙層幕牆可說是現代都市中玻璃帷幕外牆的進化版，玻璃帷幕外牆具備明亮光鮮的外觀與充足的室內採光環境，但為維持室內舒適環境，則必須仰賴大量的空調也消耗了大量的能源。建築物設計者不斷追求在維持室內環境條件不變的前提下，更有效率的能源使用及使用更少的能源。如在建築物外殼全部或部分區域帷幕牆外側再加一層帷幕牆，形成所謂的雙層幕牆，具有採光仍佳、隔絕外部熱得、降低外部噪音干擾及夾層通風等優點，有助於達成節能與建築物的使用服務性能兩者平衡。雙層帷幕牆的設計也可為亞熱帶氣候的環境營造節能的空間，國內如 2012 年完成的中鋼集團總部大樓利用鑽石形狀的雙層帷幕牆手法特殊，也運用雙層帷幕牆的方式兼顧採光通風，並具節能與減噪優點。

2.建築物外殼附置物或其他應用

- (3).**建物整合光電板(BIPV)應用**：基於綠能的積極開發與推動，建築物外殼與太陽光電板共構或甚至融入設計的手法，亦已逐漸形成風潮，如 BIPV(Building-integrated photovoltaics) 使用太陽光電板鑲嵌或設計進外牆，除提供發電功能，配合建築設計還能兼作擋雨板和裝飾、遮陽，而 BIPV 的應用與雙層幕牆的結合更可兼具綠能開發與改善室內環境功效。台南市新營區舊台南縣政府大樓於 2003 年配合經濟部能源局補助設置太陽

能光電設施，即以 BIPV 遮陽板形式呈現，兼具遮陽、通風與造型美學，是全台第一座具規模的光電建築整建案。

(4).**建築物大型施工架**：台灣地區施工架受到強風作用而倒塌的案例已屢見不鮮，施工架搭配防塵網對建築物而言，形成其第二層外牆，而且具備多孔隙的特徵。強風或颱風作用下，不同風向、不同面向、間隙連通性等均影響著施工架的結構安全，因此施工架所受到的風荷載如何考量亟待解決，如能建議合適的設計風壓係數對於施工架結構規劃，以及與建築物本體的連結繫桿規劃設計等均有裨益。

(5).**外牆廣告**：建築物立面上平貼的廣告招牌與建築物間有數十公分不等的間隙，形成第二層外牆的特徵，廣告版面可能為柔韌的帆布或硬板，部分做打孔的設計。建築外牆附掛廣告招牌受颱風作用倒塌損毀，其受風作用具有類似的氣動力特性。因此合適的設計風壓建議十分重要，才可避免颱風的破壞。

(6).**柵欄式構造**：建築物基於美感或附置物(冷氣室外機、水塔等)外觀修飾而附掛的構造，常用的是類似柵欄式的構造，如圖 1-3。



圖 1-3.建築物外觀之格柵式構造及遮陽板案例

資料來源：本研究拍攝(台中市)

以上外牆造型可用多孔性外牆加以概括，有關此類外牆的耐風設計需求與考慮因素有：

1. 台灣地區每年颱風侵襲造成甚大的災損，因此常困擾建築師的問題是設計此類型構造物，如何決定其受風作用的荷載，包括合適的內、外設計風壓係數在不同配置條件下的變化等。決定設計風壓之後，其支撐結構系統設計才可進一步做合適的規劃，包括局部強化、繫牆桿、開孔率等均可進行設計，因此掌握此類構造物的風荷載特徵至為重要。
2. 一般高層建築所受外風壓，如幾何造形單純，建築耐風設計規範中已有建議的設計風壓係數；如造型較不規則，則可利用風洞實驗加以決定。建築物主抗風結構所承受的整體風荷載可利用風洞中氣動力實驗加以決定，附掛在建築物外的雙層幕牆則屬半通透性的構件，其所受的局部風載重受到通風窗口的影響，形成半封閉狀態，外風壓固然受紊流直接作用而形成，內風壓則包含了外氣湧入及排出的影響，其壓力隨不同開口率、風向角等影響，甚為複雜，符合國內耐風設計規範所應施的基本風速條件下建議設計風壓係數亦有其實務應用上的需要。

第二節 研究內容與方法

本計畫利用風洞實驗室進行不同造型的建築物多孔性外牆風載重實驗，結合極值分析技術對於外殼所受風壓載重及內層牆表面風壓進行分析計算，建議設計風壓係數，研究內容與方法如下：

1. 文獻資料蒐集：國內外相關規範及研究論文
2. 氣動力實驗規劃：進行完整系列之風洞實驗量測
3. 資料分析：合適的內外風壓係數檢討
4. 利用甘保法模擬實驗資料極值分布曲線及推估設計風壓係數
5. 建築物多孔性外牆設計建議：建議參考設計風壓係數表及計算方

式

第三節 研究流程與進度規劃

本計畫依據計畫目標與實驗設備規劃執行之流程如圖 1-4 所示，進度規劃如表 1-1 所示。

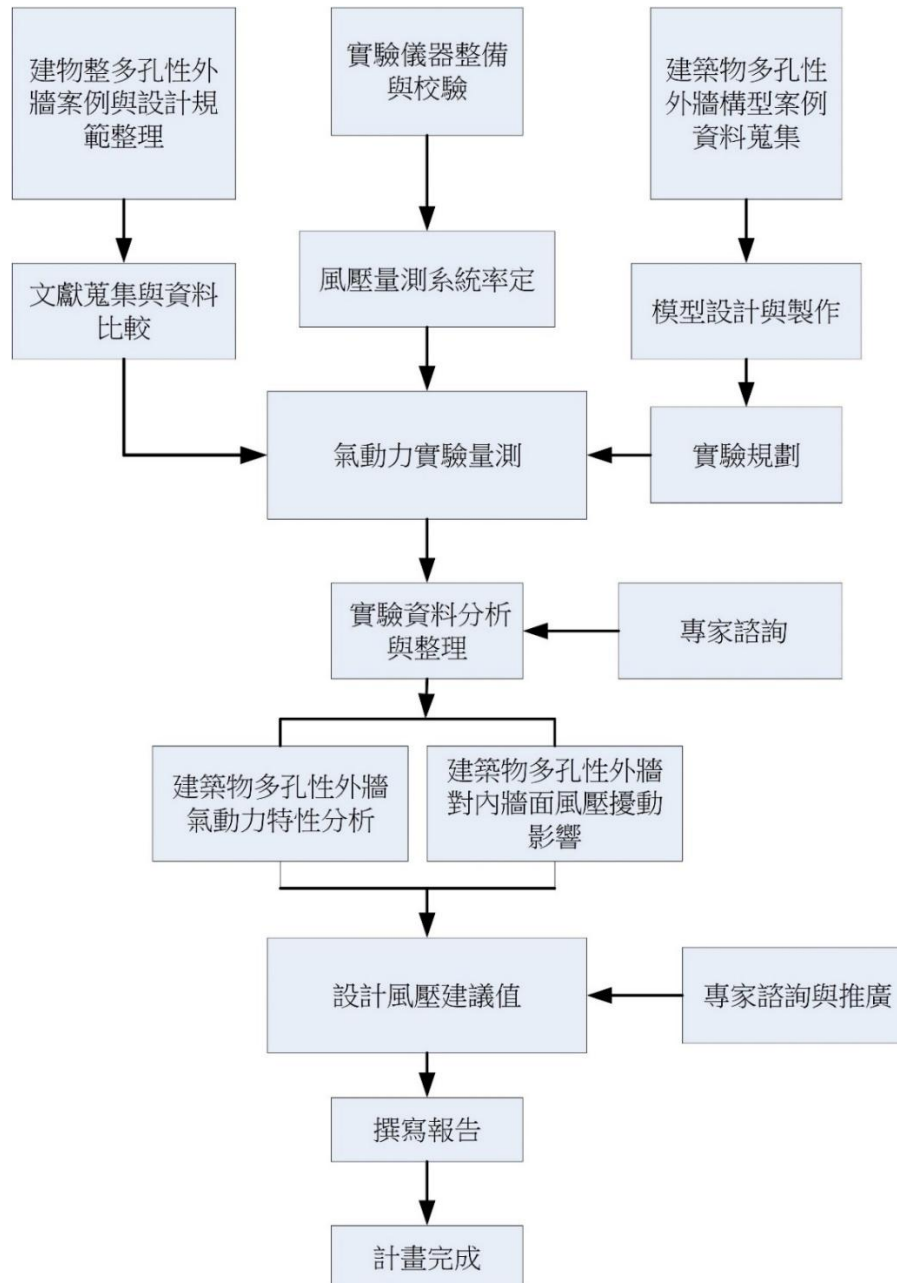


圖 1-4 計畫執行流程

資料來源：本研究繪製

表 1-1 研究進度規劃表

月次 工作項目	第 1 個 月	第 2 個 月	第 3 個 月	第 4 個 月	第 5 個 月	第 6 個 月	第 7 個 月	第 8 個 月	第 9 個 月	第 10 個 月	第 11 個 月	第 12 個 月	備 註	
文獻規範蒐集														
文獻比較分析														
模型設計與製作													▼：完成實驗驗證	
儀器校正														
風洞實驗														
實驗資料分析														
期中報告													▼：完成期中報告	
風荷載分析														
設計風壓係數檢討													▼：完成檢討	
專家座談及推廣說明														
期末報告撰寫														
預 定 進 度 (累 積 數)	6%	11%	22%	31%	36%	47%	58%	72%	86%	92 %	97%	100%		
說明	1 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定，預定研究進度以粗線表示其起訖日期。 2 預定研究進度百分比一欄，係為配合追蹤考核作業所設計。請以每 1 小格粗組線為 1 分，統計求得本計畫之總分，再將各月份工作項目之累積得分(與之前各月加總)除以總分，即為各月份之預定進度。 3 科技計畫請註明查核點，作為每 1 季所預定完成工作項目之查核依據。													

資料來源：本研究繪製

第二章 文獻回顧

第一節 關於建築物多孔性外牆等壓特性的研究

目前具節能特性的建築設計受到高度的重視，其中雙層幕牆技術亦是被廣泛應用及探討的一項先進技術，在歐美被稱為 Double Skin Facade，在中國大陸則因外殼其具備半通透性能而被譽為「可呼吸的皮膚」(樓 2008)¹。多孔隙外皮層氣動力特性的研究與雨屏牆的氣動力特性研究有密切關係及起源，國內外均有研究成果，而動機主要在於雨屏牆的等壓特性。較早期如 Gerhardt(1994)²利用風洞模型實驗與實場資料比對，探討雨屏牆設計中的多孔性外牆(Permeable facades)受到建築量體、孔隙率及空腔寬度等因素的風壓分布情形，得出外皮層所受淨風壓的變化趨勢，並於實場資料比對，可獲得一致的趨勢，但對於影響因子的量化探討及影響機制則仍需進一步研究。Choi(1998)³探討雨屏牆所受風荷載及背牆剛度間的影響，推導具有柔性背牆時相對應的內外壓變化比率，並以不可壓縮流為基礎，探討空腔體積與開孔形成的頻率域影響性，對於建築設計及實驗模型規劃上均具參考價值。Mikael Salonvarra(2007)⁴由環境控制的角度探討不同空腔量體及開口形式對於氣流流動的影響，以及內部濕度的影響，對於雨屏牆的設計具有實務的價值。

國內在建築設計上最早的應用亦屬等壓雨屏牆的設計考量，鄭(2005)⁵應用風洞實驗驗證雨屏牆產生的等壓效果指出開孔率的適度增加可提高等壓效果，小開孔率時增加中空層容積亦可提高等壓效

¹ 樓文娟，李桓，魏開重，陳勇，李煥龍，2008，典型體型高層建築雙層幕牆風壓分布試驗，哈爾濱工業大學學報，第四十卷第二期。

² H. J. Gerhardt, F. Janser, 1994, Wind loads on permeable facades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 53, 37-48.

³ Edmund C.C. Choi, Zhihong Wang, Study on Pressure-Equalization of Curtain Wall Systems, 1998, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

⁴ Mikael Salonvarra, Achilles N. Karagiozis, PhD, Marcin Pazera, William Miller, 2007, Air Cavities Behind Claddings—What Have We Learned?, ASHRAE, Buildings X.

⁵ 27. 鄭佳欣，2005，雨屏透風孔幾何形狀對雨屏牆等壓性能之研究，國立成功大學建築研究所碩士學位論文。

果，將中空層容積以透風面積相除所得之特徵長度越大則等壓效果越差，同時研究比較實驗資料顯示圓形開孔效果較長條形開口為佳。陳(2005)⁶利用風洞實驗探討風攻角對雨屏牆等壓效果的影響，實驗模型為單面雨屏牆且側向周邊氣密，在不同風攻角的作用下顯示中空層內壓變化不大，而外皮層的外風壓隨風攻角有明顯改變，因而造成等壓效果的改變。許(2007)⁷整理等壓雨屏牆所受風荷載實驗結果顯示在透風開口率 0.6%至 3.3%的範圍下，開放式接縫透風形狀等壓性能略小於圓孔開口形狀之雨屏，性能下降約七成；研究之試體採用正立方量體，受風向角影響在接近側向來流時出現較差的等壓性能。等壓雨屏牆的設計所謂等壓效果越佳係指外皮層所受風荷載相對較低，外皮層的風荷載是由外風壓與內壓聯合作用形成，類似淨風壓(Net pressure)的概念，內部背牆的風壓分布與外皮層於中空層面向的風壓(或中空層內壓)分布狀況有緊密的相關性，但仍受到中空層空間是否有側向通連至其他牆面及開放孔隙影響。

更進一步在建築物帷幕牆設計中的雙層幕牆(Double skin facades)方面，雙層幕牆可根據其外、內通風方式的不同以及有無層間水準分隔等分為多種類型，其中以廊道式雙幕牆，應用最為廣泛，它具備可自然通風，運行和維護費用低等優點。廊道式雙層幕牆由內幕牆、外幕牆、及夾在中間而與外界通風的空腔組成 (樓 2008)。風荷載是外幕牆極為重要載重，對它的瞭解是進行雙層幕牆設計的基礎，對於雙層幕牆的外幕牆，其受風作用後的淨風壓應考慮內、外表面上的壓差，相對的內幕牆，主要考慮的風壓來自其與外外幕牆間空隙廊道的壓力。如來流風攻角不同，建築物外部流場隨之劇烈變化，因此內壓亦可能有所改變。另一方面，外幕牆位於建築物不同區塊，合適的設計風壓有待釐清；如在建築物轉角位置，外幕牆背面風壓與在建築立面中央位置的氣流擾動變化差異甚大，應有

⁶ 陳兆華，2005，風攻角對雨屏牆等壓性能之研究，國立成功大學建築研究所碩士學位論文。

⁷ 許正傑、黃斌、陳太農、鄭佳欣、陳兆華，2007，等壓雨屏牆風載之研究，中華民國建築學會「建築學報」第 59 期，63~78 頁，2007.3。

合適的設計建議。文獻中關於這類幕牆風壓分佈特性的研究也開始興起，規範尚沒有對此類建築風載取值給出明確規定。(樓 2008)

第二節 關於建築物多孔性外牆的耐風設計研究

簡單構型的建築物表面雙層幕牆的受風力作用較為典型，對於相應的氣動力現象亦較為明確，研究多以此類模型進行外殼本身所受風荷載。Lo(2020)⁸以矩形雙層牆模型，探討多孔性外牆對於內牆面風壓擾動的影響，模型實驗以外層牆對風壓的過濾效果(filter effects)作為討論主題，實驗控制參數包括開孔率(25~75%)、牆間距(1~3cm、風攻角及風速等，在模型實驗方面確認雷諾數對於實驗相似率的影響，在模型雷諾數大於 60,000 以上，可獲得穩定一致的氣動力實驗成果。在多孔牆對於風壓擾動影響方面，檢核建築物表面不同位置垂直與水平帶寬的風壓分布情形，顯示在風攻角為零度時有較明顯的作用，透過多孔牆對於內牆風壓有抑制的作用，主要影響因子為開孔率與牆間距，而開孔形式的影響在此研究中並無明顯差異，研究中也指出多孔牆對內部建築物牆面的風壓有降低效果，但發現在風攻角 0 度時，角隅附近的正值尖峰風壓係數有小幅的放大現象，亦應加以注意。

陳(2020)⁹以具有均勻開口分部之雙層牆氣動力模型進行實驗量測，建築物高寬比為 1:1，如圖 2-1 所示，實驗模型可改變雙層牆間的間隔距離，而在間隔的頂部及側邊亦具有開口，可選擇性開啟，以測試在不同間隔距離及開口率的外牆荷載。

⁸ Yuan-Lung Lo, Yu-Ting Wu, Chung-Lin Fu, Ying-Chang Yu, 2020, Wind load reduction effects on inner buildings by exterior porous façades, Building and Environment, 183, 107-148.

⁹陳若華，2020，建築物外加多孔隙外牆風荷載之風洞實驗研究，第八屆全國風工程研討會，國立台灣科技大學，台北市。

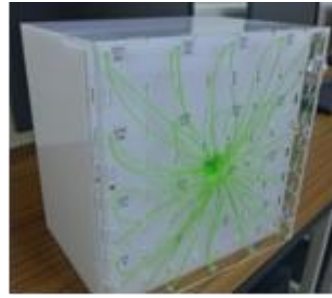


圖 2-1 具有單面多孔性外牆建築模型，可變化更換外牆以變化牆間距、側邊開放性及開孔率

資料來源：陳(2020)

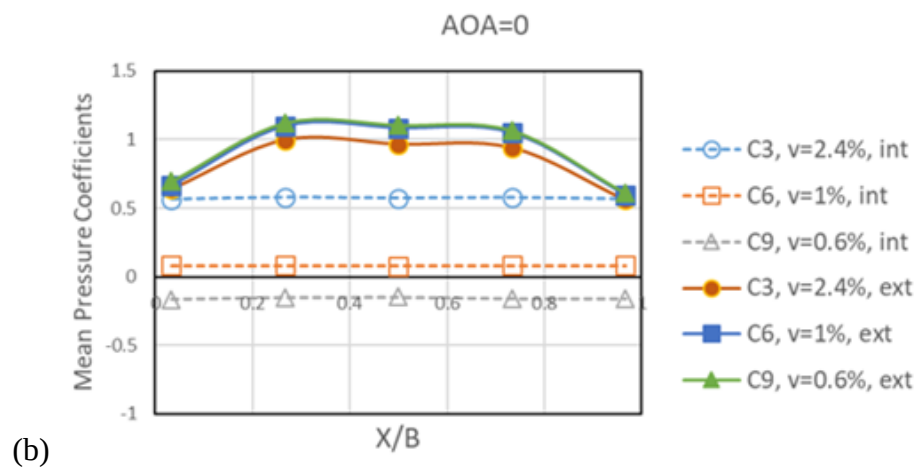
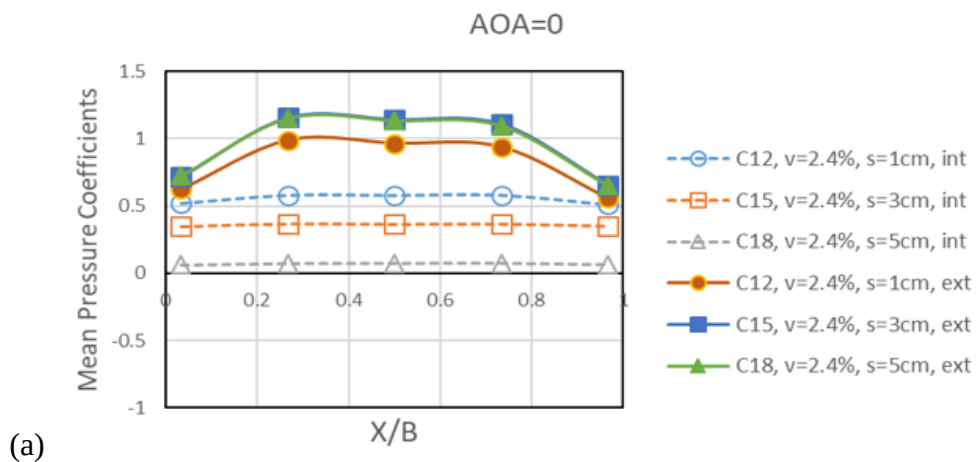


圖 2-2 具有單面多孔性外牆建築模型，中央高度處平均風壓係數分布情形(a)固定開孔率 2.4%時，內外表面風壓分布受牆間距之影響，
(b)固定牆間距 2cm 時，內外表面風壓分布受開孔率之影響。

資料來源：陳(2020)

研究結果如圖 2-2 所示，由於外牆具有開口而側邊及頂部開口，

受風作用時將將引入外部氣流進入夾層，影響風壓分布，來流風攻角零度作用下，平均外風壓係數變化不大，平均內風壓係數則有明顯的改變，平均內風壓係數隨間距增加而下降、隨開孔率的增加而上升。由於多孔性外牆所受風荷載以外風壓減內風壓的淨風壓(net pressure)方式考量，因此外風壓係數變化不大情形下，內風壓係數的變化更形重要。

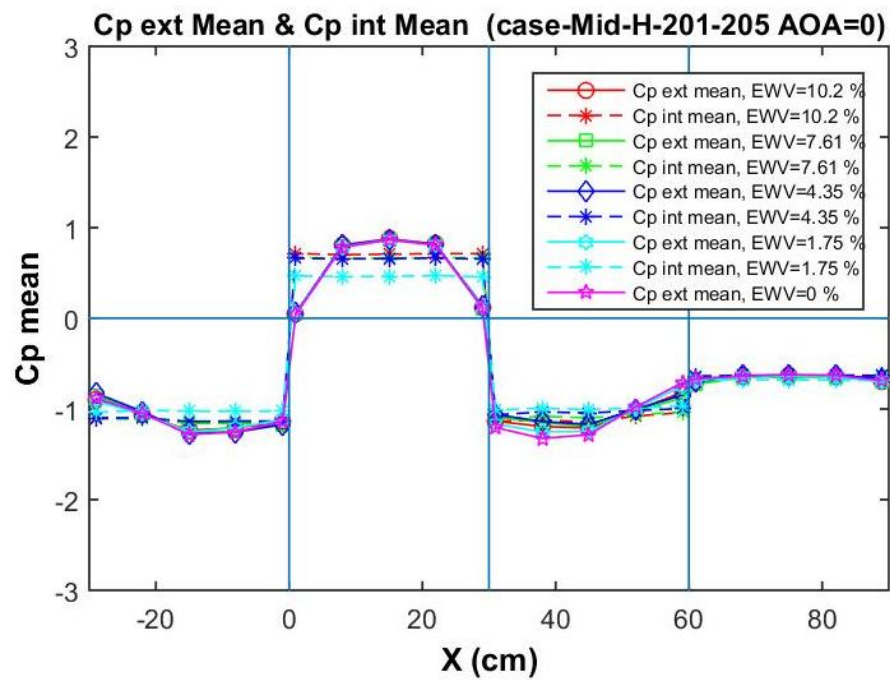
陳(2021)¹⁰以高寬比 1.6 的方形斷面矩柱體進行雙層外牆的氣動力實驗，四面外牆均安裝多孔性外牆，可調整變化開孔率，固定牆間距為 2cm，模型如圖 2-3 所示。內外風壓係數如圖 2-4 所示，平均外風壓係數無明顯變化，平均內風壓係數與相鄰牆面夾層是否連通有關係，各面向獨立情況下，內風壓係數趨定值，基本上仍反映各不同面向表面風壓特徵，顯示來自單面的外壓滲入。相鄰夾層有相通情況，隨開孔率的增加，各面向的差異增加，且在較高的開孔率條件下，角隅處內壓有上升的現象。但以上研究成果涵蓋之開孔率仍屬低開孔條件，缺乏對於 25%以上高開孔率情況下的氣動力資料，如要應用於建築設計參考，需檢核更高開孔率條件下的內外風壓係數變化關係，並推估合理的設計風壓係數。



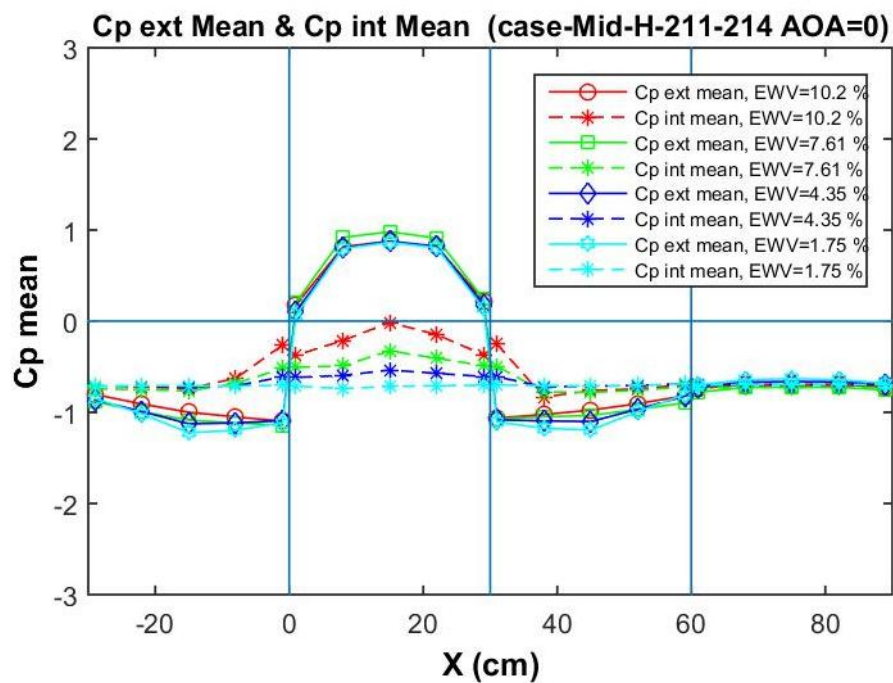
圖 2-3 具有四面多孔性外牆建築模型，可變化更換外牆以變化牆間距、側邊開放性及開孔率

資料來源：陳(2021)

¹⁰ 26. 陳若華，2021，應用風洞實驗探討建築物多孔隙雙層外牆之設計風載重，行政院科技部鼓勵技專校院從事實務型研究專案計畫成果報告，MOST 108-2637-E-270-001。



(a)



(b)

圖 2-4 風攻角 0 度、夾層間距 2cm、不同孔隙率對中間高度帶狀區域之內外風壓係數及淨風壓係數之影響(a)四面夾層不連通， (b) 四面夾層相互連通。

資料來源：陳(2021)

林(2016)¹¹研究建築物施工架受風作用情況，使用薄壓克力板搭配縮尺施工架模型探討風壓分布狀況，以單面牆為主，研究指出施工架立面上較大淨壓力的擾動值多發生於施工架系統的邊緣或角隅，顯示風向的影響以及結構位置差異甚大，對於孔隙率的影響則尚待進一步研究。

第三節 多孔性外牆對高層建築風致振動影響研究

建築物受風作用，由於周邊渦流作用並與建築物發生交互作用，因此產生風致振動(Simu 1996)¹²。許多的研究致力於探討如何減少風致振動，Kwok(2014)¹³利用 CAARC 標準高層建築模型，加掛多孔式外牆(porous facade)於建築物前方立面，仍保持小間隙，利用風洞中氣彈力實驗檢驗其位移反應與未加裝多孔式外牆的比較，研究顯示在無因次化風速(reduced velocity)4~14 的範圍內，不論順風向、橫風向及扭轉向位移反應均明顯下降，顯示創新外殼設計對於高層建築風致振動的抑制，具有開發的潛力。Kwok 的實驗主要考慮 0~45 度風攻角，而其多孔性外牆採用的是沿高度方向發展的溝槽，並利用封貼部分溝槽達到變化開孔率的目的，模型雙層外牆間隙 5mm，依模型縮尺 1:400 推估，為實場 2 公尺的間隔，而且周邊為開放式。Kwok(2014)研究成果激發採用複合式外殼降低高層建築風致振動的概念，對於其他不同幾何條件、不同外殼配置方式、與建築物附置物整合設計等想法，具有啟發的作用。

Andrea(2019)¹⁴運用 CFD 模擬二維矩柱前方安裝網柵(screen)

¹¹林楨中、顏聰，2016，外牆框式施工架風災分析與風力之探討，勞動部勞動及職業安全衛生研究所成果報告，ILOSH105-S307。

¹² 12. Simu, E. & R.H. Scanlan, "Wind effect on structures", Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 3rd. edition, 1996.

¹³ 6. Kwok, KCS, Samali, B, Hu, G, Tse, KT 2014, 'Wind-induced response reduction of a tall building with an innovative façade system', in ST Smith (ed.), 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), vol. II, Byron Bay, NSW, 9-12 Dec., Southern Cross University, Lismore, NSW, pp. 993-998..

¹⁴ Andrea Giachetti, 2019, Wind effect on permeable tall building envelopes: Issues and Potentialities, CTBUH Journal Issue III, pp.20-27.

時，周邊流場的變化，計算結果顯示，前緣加裝網柵將使得邊分離剪力流的分離角度變小，同時側邊渦漩生成變小，計算成果有助於理解加裝網柵對於抑制風置振動的效果，可採用類似觀念進一步應用於安裝不同複合是外殼條件的矩形建築模型，其周邊流場與間隙流場的變化，對於未來氣動力實驗風壓分布及氣彈力實驗位移結果的驗證均有助益。

第四節 極值分析理論於風工程中設計氣動力參數推估

由風洞實驗可獲得大量的氣動力載重資料，但一般常用的平均值、均方根值等統計公式僅可表達時間平均後的現象，對於設計者而言，更關心如何推估合理兼顧安全與經濟的尖峰風壓值，建議設計風壓係數以供結構設計之用。

文獻中有許多學者針對氣動力參數的評估發表了以各種角度切入的評估方式，而每種方式均各有優缺點。一般來說，探討極值氣動力參數可歸類於兩大方法論—(1)由觀察值決定(observed peak methods)；(2)由高斯過程的極值分布透過轉換法映射至非高斯極值分布(translation methods)。第一種方法論下包含了許多學者提出的建議：Stathopoulos(1979)¹⁵採用採樣時段內單一觀察的極大值；Holmes 等人(1989)¹⁶則採用數個觀察極大值的平均值；Cook 和 Mayne(1980)¹⁷則以甘保曲線擬合數個觀察極大值並設定一特定的百分比，其對應之值方為設計極值氣動力參數。而最後者則多為其他學者所引用，並常稱為甘保法(Gumbel Method)。第二方法論則基於蒐集資料不易且通常為短時間特性，因而發展出由假定為高斯性質的累積機率分布，經由轉換法映射至非高斯性質的累積機率分布。

¹⁵ Stathopoulos, T., Surry, D., Davenport, A.G. (1979). "Internal pressure characteristics of low-rise buildings due to wind action". Proceedings of the 5th International Wind Engineering Conference 1, 541-463, Forth Collins, Colorado USA.

¹⁶ J. D. Holmes, W. H. Melbourne, G. R. Walker, 1989, A Commentary on the Australian Standard for Wind Loads AS1170 Part2, Australian Wind Engineering Society, Melbourne.

¹⁷ N. J. Cook, J. R. Mayne, 1980, A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 6(1-2), 125-137.

Kareem 和 Zhao(1994)¹⁸利用 moment-based Hermite 多項式定義由高斯過程轉換為非高斯過程的方法。其後 Kareem 和 Kwon(2011)¹⁹採用 Winterstein 和 Kashef(2000)²⁰所提出更為完整的 Hermite 多項式轉換式，進一步修改為更準確且更大適用範圍的轉換方法。Sadek 和 Simiu(2002)²¹分別利用 Gamma 函數及高斯分布模擬時間序列的長尾效應及短尾效應。Huang 等人(2013)²²則建議以核心函數平滑化的技巧，發展出以機率分布模式描述高斯過程映射至非高斯過程的關係。Peng 等人(2014)²³後續則以 Kareem 和 Kwon(2011)所提出的轉換法為依據進行修改，提出更佳準確模擬的方法。

設計風載重的計算可以經由下式(1)決定：

$$w_{des} = \frac{1}{2} \rho_{des} v_{des}^2 c_{des} \quad (1)$$

其中 ρ_{des} 是設計空氣密度，可以藉由空氣濕度及溫度決定。然而在一般的室溫下，多假設為 1.15 至 1.25 kg/m³ 範圍內。 v_{des} 為設計風速，由標的物所在的地區長年累積的氣象資料進行分析所獲得，又因為其值的評估多以極值分析理論進行，因此又可稱為極值風速。 c_{des} 則為設計風速風壓係數，由標的物幾何外型所決定，可以透過合理的風洞實驗求得。

¹⁸ A. Kareem, J. Zhao, 1994, Engineering Stochastic response analysis of tension leg platform: A statistical quadratization and cubicization approach, J. Engineering, vol.31.

¹⁹ D. K. Kwon and A. Kareem, 2011. Peak factors for non-Gaussian load effects revisited, J. Structural Eng. 137(12) 1611–1619. (DOI: 10.1061/(ASCE) ST. 1943-541X.0000412)

²⁰ S. R. Winterstein, T. Kashef, 2000, Moment-based Load and Response Models with Wind Engineering Applications, J. Sol. Energy Eng., Trans., ASME, 122(3), 122–128.

²¹ F. Sadek, E. Simiu, 2002, Peak Non-Gaussian Wind Effects for Database-Assisted Low-Rise Building Design, Journal of Engineering Mechanics-asce, vol.128, Issue 5.

²² M. Huang, W. Lou, C. Chan, N. Lin, X. Pan, 2013, Peak Distributions and Peak Factors of Wind-induced Pressure Processes on Tall Buildings, J. Eng. Mech., 139(12), 1744–1756.

²³ Yuan Peng, 2014, Propagation of wind turbine noise through wakes and turbulent atmosphere, Environmental Science, Physics.

由 Cook and Mayne (1980)提出基於年破壞超越機率，利用極值風速及極值風壓係數的聯合機率密度分布函數來求取設計風壓係數的方法。根據圖 2-5 所示，假設風洞實驗中符合雷諾數穩定時，極值風速分布與極值風壓係數分布互相獨立，可以假設兩者的聯合機率密度分布為個別的機率密度分布相乘，如式(2)所示：

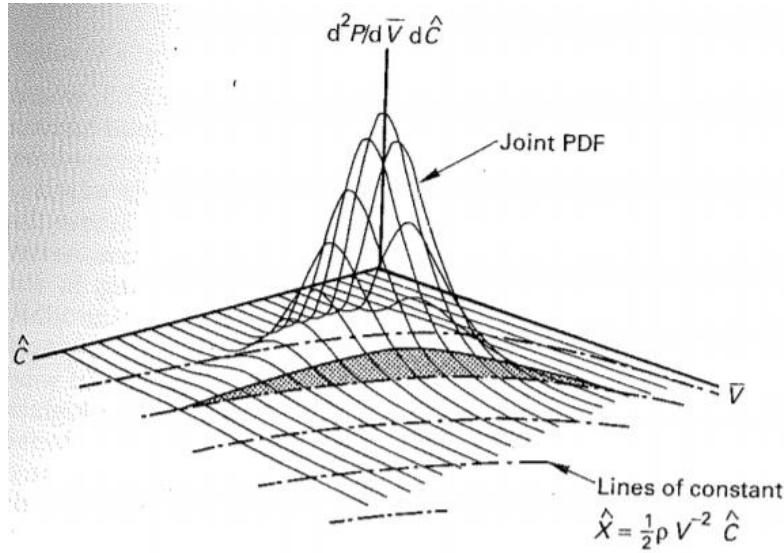


圖 2-5 極值風速與極值風壓係數的聯合機率密度分布圖

資料來源：Cook and Mayne (1980)

$$f(c, v) = f_c(c)f_v(v) \quad (2)$$

式(2)中的機率密度分布函數 $f_c(c)$ 和 $f_v(v)$ 可採取一般常見的甘保分布或者廣義極值分布。而通常極值分布函數多以累積機率密度分布函數來表示。如式(3)、(4)分別為甘保分布及廣義極值分布。此兩式以極值的平均值及標準差來表示，有益於之後計算時考量極值風速及極值風壓係數的變異係數(Coefficient of Variation)。

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\gamma + \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{x - m_x}{\sigma_x}\right)\right]\right\} \quad (3)$$

$$F(x) = \exp \left[- \left(f_1 - \text{sign}(\tau) \cdot f_2 \cdot \frac{x - m_x}{\sigma_x} \right)^{\frac{1}{\tau}} \right] \quad (4a)$$

$$f_1 = \Gamma(1 + \tau) \quad (4b)$$

$$f_2 = \sqrt{\Gamma(1 + 2\tau) - f_1^2} \quad (4c)$$

兩式中 γ 為 Gamma 函數，其值為 0.57726； x 為極值變數； m_x 為極值變數的平均值； σ_x 為目標極值變數的標準差； τ 為廣義極值分布的形狀參數，同樣具備有決定極值分布曲線尾端性狀的功能。若 τ 為 0 時，式(4)會收斂至式(3)而成為甘保分布。若 τ 不為 0 且大於 0 時，則為弗雷歇分布(Frechet distribution)；若 τ 不為 0 且小於 0 時，則為韋伯分布(Weibull distribution)。由於廣義極值分布基本上由三個參數所決定，因此可以預想式(1)及式(2)中所涉及的關係必須同時考量此三個參數變化。其中，可以進一步定義極值變數的變異數為式(5)：

$$\text{cov}(x) = \frac{\sigma_x}{m_x} \quad (5)$$

由圖 2-5 中所示，假設可以找到一組風載重等同於式(1)，亦即：

$$\frac{1}{2} \rho v^2 c = \frac{1}{2} \rho_{des} v_{des}^2 c_{des} = w_{des} \quad (6)$$

則必定有無限多 (ρ, v, c) 組合可以滿足式(6)。倘若我們進一步簡化

空氣密度為常數而非變數，則式(7)成立：

$$v^2 c = v_{des}^2 c_{des} \quad (7)$$

在式(7)中仍然可以發現要得到式子成立的組合仍有無數多種。然而我們可以引進年破壞超越機率的概念來達到求取正確的設計風壓係數方法。以採取使用年限 50 年的第三類建築物為例，其年破壞超越機率則為 1/975，大約為 1/1000 即 0.001。轉換為非超越機率則為 $1 - 0.001 = 0.999$ 。換言之，對照至圖 2-1 中，則可以理解，當 $c - v$ 平面的 $\frac{1}{2}\rho v^2 c$ 常數曲線移動至 $\frac{1}{2}\rho_{des} v_{des}^2 c_{des}$ 時，其曲線下所

包含之曲面體積應達 0.999 機率。假設空氣密度為 1.25 kg/m^3 ；極值風速屬於甘保分布，其平均值為 16 m/s、標準差為 2.4 m/s；極值風壓係數屬於甘保分布，其平均值為 1、標準差為 0.125 時，可以將圖 2-5 以 MATLAB 程式繪製成 $c - v$ 平面等高線分布圖，如圖 2-6 所

示。若將每一組 (v, c) 代入計算其風載重估算值，則可以獲得圖 2-7

的結果。當圖 2-3 中的曲線下方所佔的曲面體積積分等同於非超越機率值 0.999 時，則該曲線滿足式(6)。將此時的 w_{des} 、符合 0.999

非超越機率的已知 v_{des} 、以及空氣密度 ρ 代入式(1)反算則可以獲得

c_{des} 。再進一步將 c_{des} 以及 m_c 、 σ_c 代入式(3)，則最終可以獲得 $F_{c,des}$ ，

極值風壓係數的最佳非超越機率值。此即為 Cook and Mayne 法的流程。

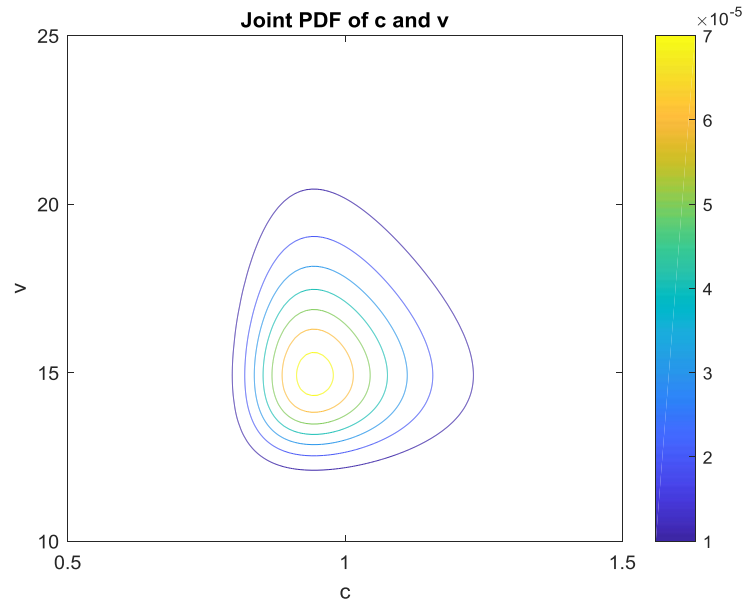


圖 2-6 $c-v$ 平面聯合機率密度等高線分布圖($\tau_v = 0$ 、 $\tau_c = 0$)

資料來源：本研究繪製

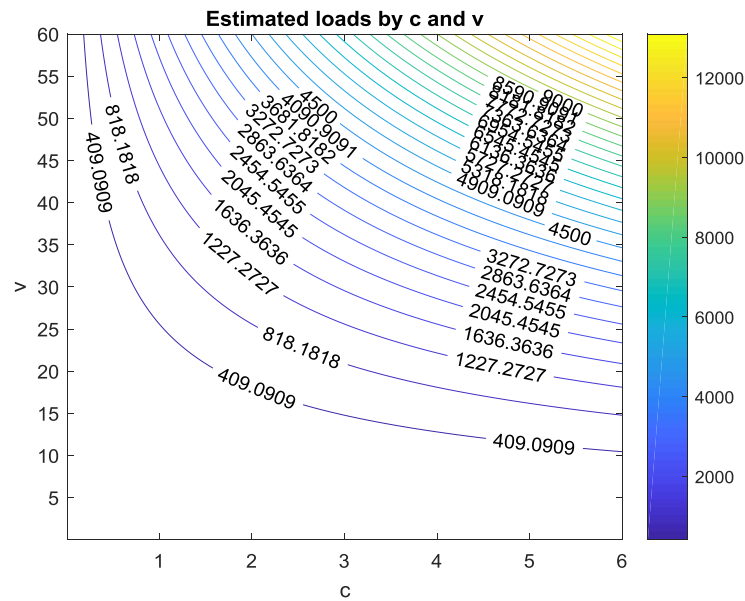


圖 2-7 $c-v$ 平面風載重估算值等高線分布圖($\tau_v = 0$ 、 $\tau_c = 0$)

資料來源：本研究繪製

根據 Cook (1990)²⁴利用英國實場監測風速資料的特性、以及低矮建築物風洞實驗模型的風壓係數於各風向角下的特性，歸納訂出極值風壓係數的非超越機率百分比可假設為 78%，稱為 Cook and Mayne 係數(1980)，為目前探討風洞實驗極值數據時，最常用來探討設計風載重的作法。後來 ISO 規範(2009)亦納入此概念，並更加保守地採用 80%非超越機率值。

倘若採用甘保分布曲線來描述極值風速分布特性，且配合 Cook and Mayne 係數之 78%非超越機率，利用甘保分布曲線來擬合極值風壓係數的分布特性，可以稱為甘保法。其中針對甘保曲線的擬合則可以式(3)或式(8)表示：

$$F_{X_{pk}}(x; t) = \exp\{-\exp[-\alpha_t(x - U_t)]\} \quad (8)$$

其中 α_t 及 U_t 為甘保曲線的兩項參數，由觀察到的極值序列經擬合後決定； x 為風壓係數值； t 為觀察單一極值所對應到的時間區段長度。利用如圖 2-8 所列之方法(BLUE、Maximum Likelihood Method、Method of moments、Least-square fit method)，擬合 N 個觀察值後決定 α_t 及 U_t 。

²⁴ N. J. Cook, 1990, Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures Part 2: Static structures (Building Research Establishment Report), Published by Butterworth-Heinemann Ltd.

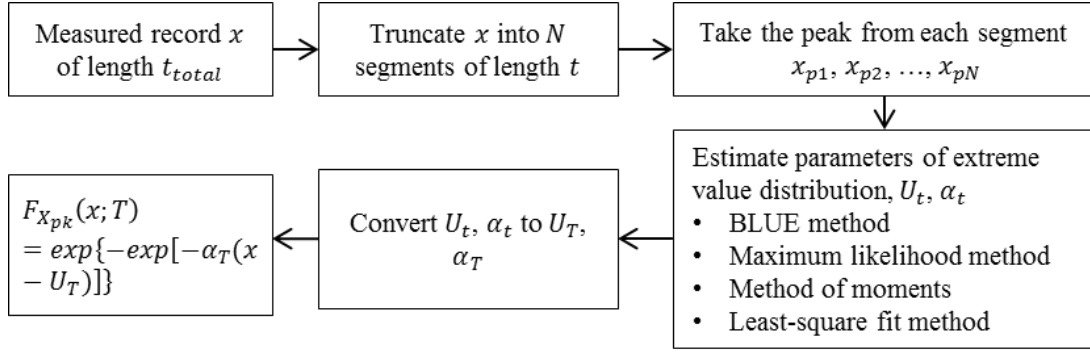


圖 2-8 甘保法主要分析流程

資料來源：本研究繪製

此方法需要足夠的觀察值(總時間區段長度為 $t_{total} = Nt$)，且所決定之累積機率分布函數(CDF)對應時間區段長度為 t 。舉例來說，以實場尺度十分鐘為時間區段的累積機率分布函數為對象，對應超越機率(Probability of Exceedance, POE)22%的極值風壓係數即為，將總時間長度 160 分鐘區分為 16 個十分鐘區段，觀察此 16 個時間區段的最大值，並利用此 16 個極值作為擬合甘保曲線兩參數的資料點，然後對應此擬合曲線的超越機率 22%之處，即為所欲了解的極值風壓係數。

針對擬合甘保曲線兩參數時，亦可透過不同時間區段長度的轉換關係式，來使少數的觀察資料代表較長時間區段的極值觀察。如下式所示，若有兩不同時間區段長度 t 和 T ，且 $t < T$ ，則轉換式可寫為：

$$\alpha_T = \alpha_t \quad (9)$$

$$U_T = U_t + \left(\frac{1}{\alpha_t}\right) \ln\left(\frac{T}{t}\right) \quad (10)$$

)

Kasperski(2003)²⁵以及 Holmes 和 Cochran(2003)²⁶分別應用韋伯分布(Weibull Distribution)及廣義化極值分布曲線(Generalized Extreme Value Distribution)取代甘保曲線做為更精準的擬合對象。然而甘保曲線以擬合效率及簡易性來說，仍為主要的使用對象。此外，對於輕度或強度非高斯(mildly- or strongly non-Gaussian)時間序列來說，甘保法的應用可以獲得相近的準確性。對於輕度非高斯序列來說，轉換法僅需要少數的資料量即可獲得與甘保法相同的準確性；而對於強度非高斯序列則較無法保證其模擬之準確性。

第五節 耐風設計規範中有關外牆設計風荷載

我國建築物耐風設計規範對於建築物所受風荷載的考慮，包括主抗風結構系統設計風力及表面被覆物局部風壓兩大類不同用途來定義風荷載。所謂主要風力抵抗系統係提供作為次要構件及外部被覆物支撐之主要結構組合體，如：剛構架及斜撐構架、空間桁架及剪力牆等。而局部構件及外部被覆物則為直接承受風力的外部被覆物或構件及接受其附近外部被覆物產生之風力，並將其傳送到主要風力抵抗系統之構材者。如帷幕牆上的玻璃窗及框架，屋頂被覆物、平行桁條及屋頂桁架等。規範對於基本設計風速 $V_{10}(C)$ 定義為地況 C 之地況上，離地面 10 公尺高，相對於 50 年回歸期之 10 分鐘平均風速，其單位為 m/s。各項設計風壓係數的推估須與基本風速定義有相同的設定條件，相關名詞彙整如表 2-1 所示。

設計風壓方面，我國建築物耐風設計規範對於封閉式、部分封閉式或開放式普通建築物或地上獨立結構物之主要風力抵抗系統所應承受之設計風壓 p ，依據規範 2.2 以下式加以考慮：

²⁵ Kasperski, M. , 2003, Specification of the design wind load based on wind tunnel experiments. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91,527–541.

²⁶ Goodwin, I., Holmes, G., Cochran, R., & Mason, O. (2003). The ability of adult mental health services to meet clients' attachment needs: The development and implementation of the service attachment questionnaire. Psychology and Psychotherapy: Theory, Research and Practice, 76(2), 145–161.

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (11)$$

式中對迎風面牆，外風速壓 q 採 $q(z)$ ；對背風面牆、側牆與屋頂，外風速壓 q 採 $q(h)$ ； $q(z)$ 與 $q(h)$ 依規範 2.6 節之規定計算。對封閉式建築物或內風壓取負值之部分封閉式建築物，內風速壓 q_i 採 $q(h)$ ；對內風壓取正值之部分封閉式建築物，內風速壓 q_i 可採 $q(z_{h_0})$ 或 $q(h)$ ，其中， z_{h_0} 為會影響正值內風壓之最高開口高度。 G 為普通建築物之陣風反應因子，依規範 2.7 節之規定計算。 C_p 為外風壓係數，依規範 2.8 節之規定計算。 (GC_{pi}) 為內風壓係數，依規範 2.9 節之規定計算。

前式所規範的為提供考慮建築物主要風力抵抗系統所應承受的設計風壓時使用，對於建築物多孔性外牆設計風壓的考慮，參考建築物耐風設計技術手冊(2017)²⁷有關建築物帷幕牆所受風壓計算方式，係依規範 3.1 節對於規則性封閉式、部分封閉式與開放式建築物或地上獨立結構物之局部構材及外部被覆物進行考慮，因此所應承受之設計風壓，建議依規範第三章規定的方法計算之。同時規範 3.1 節建議若有可靠之試驗結果或文獻提供證明，在計算時可考慮由其他鄰近建築物或障礙物之遮蔽所造成之風速壓折減，或考慮透氣性外牆之風壓折減。若局部構材及外部被覆物之受風面積大於 65 平方公尺，則也可依規範 2.2 節之公式計算設計風壓，亦即前述之設計風壓公式。

由建築物耐風設計技術手冊(2017)有關建築物帷幕牆所受風壓計算，以建築物局部構材及外部被覆物方式考慮，對於不超過 18 公尺高之帷幕牆所受風壓計算採用規範(3.1)式計算，

$$p = q(h)[(GC_p) - (GC_{pi})] \quad (12)$$

式中， $q(h)$ 為平均屋頂高度 h 處之風速壓，依規範 2.6 節之規定計算； (GC_p) 為外風壓係數，依規範 3.3 節之規定計算； (GC_{pi})

²⁷ 建築物耐風設計技術手冊，內政部建研所出版，2017，ISBN 978-986-05-3100-8

為內風壓係數，依規範 2.9 節之規定計算。

超過 18 公尺高之帷幕牆所受風壓計算則採用規範(3.2)式計算，

$$p = q(GC_p) - q_i(GC_{pi}) \quad (13)$$

式中對迎風面牆，風速壓 q 採 $q(z)$ ；對背風面牆、側牆與屋頂，風速壓 q 採 $q(h)$ ； $q(z)$ 與 $q(h)$ 依規範 2.6 節之規定計算。對封閉式建築物或內風壓取負值之部分封閉式建築物，風速壓 q_i 採 $q(h)$ ；對內風壓取正值之部分封閉式建築物， q_i 採 $q(z_{h_0})$ 或 $q(h)$ ，其中， z_{h_0} 為會影響正值內風壓之最高開口高度。 (GC_p) 為外風壓係數，依規範 3.3 節之規定計算。 (GC_{pi}) 為內風壓係數，依規範 2.9 節之規定計算。規範建議之建築物局部構材及外部被覆物之外風壓係數(GC_p)係數，如表 2-2 所示。

以上計算設計風壓時採用的方式為外風壓與內風壓相減的方式，因此內外風壓係數均要分別考慮。關於外風壓係數方面，依據規範 3.3 節，對於封閉式或部分封閉式建築物局部構材及外部被覆物之外風壓係數，以建築物高度 18 公尺為區分，定義建築物中局部構材及外部被覆物之外風壓係數(GC_p)。有關外風壓係數(GC_p)的選取，規範以查閱圖表方式定義，如規範之圖 3.1 與圖 3.2，分別供建築物高度小於及大於 18 公尺之案例使用。此部分與 ASCE7-16 關於建築物局部構材及外部被覆物之外風壓係數(Chapter 30)之規定相類似。

表 2-1 耐風設計規範中有關外牆設計風荷載相關名詞彙整

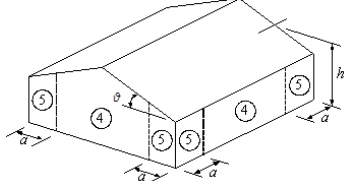
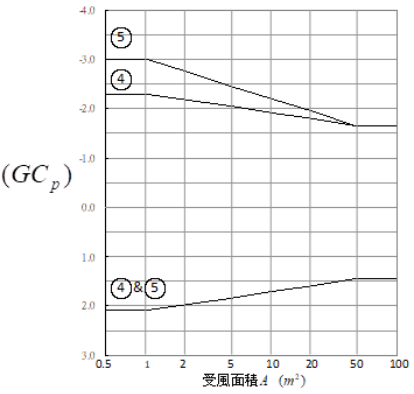
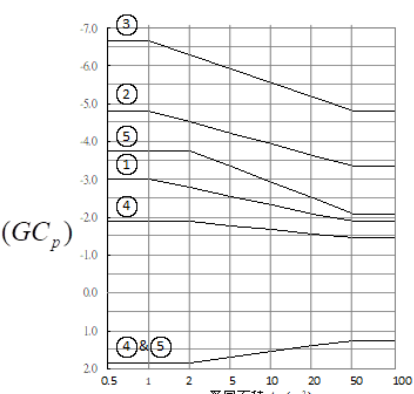
名 詞	分類定義	說 明	案 例
建築物所受風荷載	主抗風結構系統設計風力	提供作為次要構件及外部被覆物支撐之主要結構組合體。	剛構架及斜撐構架、空間桁架及剪力牆等。
	表面被覆物局部風壓	直接承受風力的外部被覆物或構件及接受其附近外部被覆物產生之風力，並將其傳送到主要風力抵抗系統之構材者。	帷幕牆上的玻璃窗及框架，屋頂被覆物、平行桁條及屋頂桁架等。
基本設計風速 $V_{10}(C)$	地況 C 之地況上，離地面 10 公尺高，相對於 50 年回歸期之 10 分鐘平均風速，其單位為 m/s。		各項設計風壓係數的推估須與基本風速定義有相同的設定條件。
開放式建築物	建築物至少兩個牆面各有 80% 以上之面積為開口。		
部分封閉式建築物	在考量的來風方向下，建築物同時滿足以下各條件：(1) $A_0 > 1.10A_{0i}$ ，(2) $A_0 > 0.37m_2$ 或 $0.01A_g$ （二者取小值），(3) $A_{0i}/A_{gi} \leq 0.20$ 其中， A_g 為迎風向外牆面之總面積， A_0 為迎風向外牆面之總開口面積， A_{0i} 為非迎風向之各牆面（含屋頂）總開口面積， A_{gi} 為非迎風向之各牆面（含屋頂）總面積。		

資料來源：本研究整理

關於內風壓係數方面，我國建築物耐風設計規範表 2.17 針對封

閉式建築、部分封閉式建築及開放式建築所採用的內風壓係數(GC_{pi})有所建議。規範建議之不同型態建築物之內風壓係數(GC_p)係數，如表 2-3 所示。

表 2-2 我國建築物耐風設計規範建議之建築物局部構材及外部被覆物之外風壓係數(GC_p)係數

設計風壓係數分區	 a: 取 0.4 h 或最小寬度的 10%，兩者中較小者。 但 a 不能小於 0.9 m 或最小寬度的 4%。
外牆外風壓係數 ($h \leq 18$ m 封閉式或部分封閉式建築物之局部構件及外部被覆物)	
外牆與屋頂外風壓係數 ($h > 18$ m 封閉式或部分封閉式建築物之局部構件及外部被覆物)	

資料來源：本研究整理

表 2-3 我國建築物耐風設計規範建議之內風壓係數

	(GC_{pi})
開放式建築	0.00
部分封閉式建築	+1.146 -1.146
封閉式建築	+0.375 -0.375

註：下面兩種情況皆須分別考慮

1. 所有牆內面之 (GC_{pi}) 為正值。
2. 所有牆內面之 (GC_{pi}) 為負值。

資料來源：建築物耐風設計規範及解說(2015) 表 2.17

對於多孔性外牆，如前述討論採用局部構材及外部被覆物的概念進行計算風荷載可較符合通用的計算流程，有其一致性。而我國耐風設計規範所建議的內風壓係數指的是建築物內部風壓，對於多孔性外牆與建築物之間距形成的內風壓有適用性的問題。

考慮多孔性外牆與建築物之間的間距與建築物量體相較甚為微小，而開孔率的變化甚大，則內外設計風壓係數的取用，應有所檢驗或合適的建議值。

第三章 研究方法

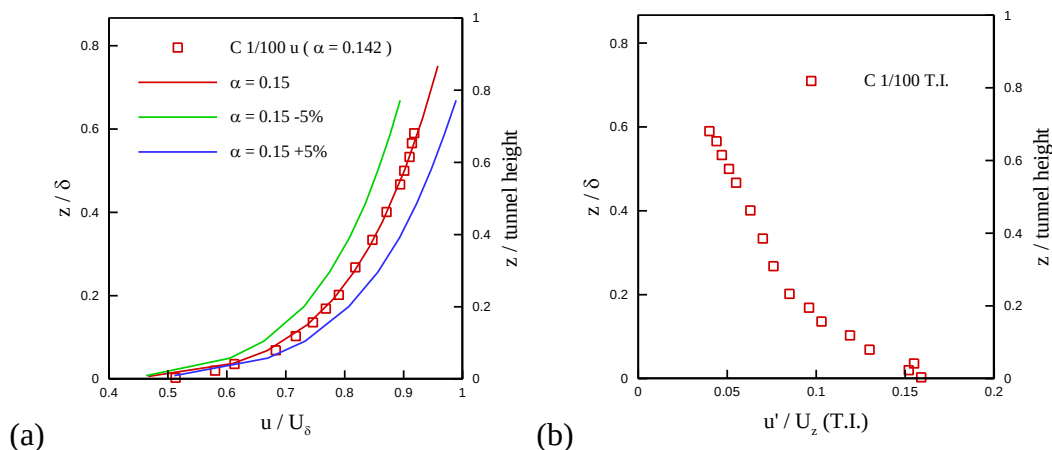
本計畫主要有兩個研究重點，一個是建立合適的多孔性外牆設計風壓係數值，另一個是探討多孔性外牆不同配置方式下對於內部建築物風壓擾動的抑制情形。利用風洞實驗室進行不同配置方式的建築物多孔性外牆風載重實驗，分析氣動力特性，並結合極值分析技術對於外殼所受風壓載重及內層牆表面風壓進行分析計算。

關於多孔外牆的風載重取決於內外風壓差，內外風壓變化的特性需先加以掌握，再推估其設計風壓係數，規劃研究內容與方法如下所述。

第一節 氣動力實驗規劃

氣動力實驗工作將分為兩階段進行，第一階段目標為驗證模型內外風壓與模型內夾層配置關係，第二階段則依據前階段成果，修正模型設計方式、分析方法、規劃實驗與分析程序，製作模型進行系列的氣動力實驗，推估設計風壓係數與探討多孔外牆之防風特性。

1. 第一階段氣動力實驗之流場規劃：本研究使用本所位於台南之風雨風洞實驗室進行氣動力實驗，採用模擬 C 地況之大氣邊界層流場，進行具有多孔性外牆之建築物氣動力模型實驗研究。風洞高度(tunnel height)為 260 公分，流場剖面如圖 3-1 所示。



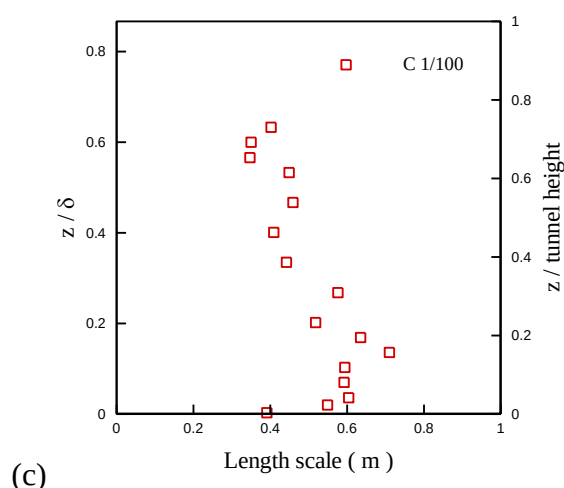


圖 3-1 風洞實驗流場剖面圖 (a)平均風速剖面 (b)紊流強度剖面 (c) 積分尺度剖面

資料來源：本研究繪製

2. 第一階段氣動力實驗模型設計：第一階段實驗以驗證模型設計參數為主，考慮多孔外牆所受風載重來自內外風壓差，內外風壓受開孔率的影響是否有變化，以及夾層空間內是否有劇烈的壓力梯度存在，需先行驗證，因此第一階段設計驗證模型，先行探討其變化機制。模型設計如圖 3-2 所示，包括兩個模型，分別驗證相鄰夾層連通性的影響及內壓梯度的影響性。考慮氣動力實驗所用的流場條件以及設計風速推估縮尺，計算說明如表 3-1 所示。

表 3-1 第一階段氣動力實驗模型縮尺說明

長度縮尺	1/100		
地況縮尺	1/100	(C 地)況	
邊界層高(m)	300		
α	0.15		
實驗風速(模型高)	10.752		
模型高(m)	0.5	實場高(m)	50
設計風速 $V_{10}(C)$	42.5	$V_{50}(C)$	54.104

速度縮尺	1/5	(5.032)
時間縮尺	1/20	
採樣頻率	1/256	
換算實場 $\Delta t(\text{sec})$	0.0781	

資料來源：本研究整理

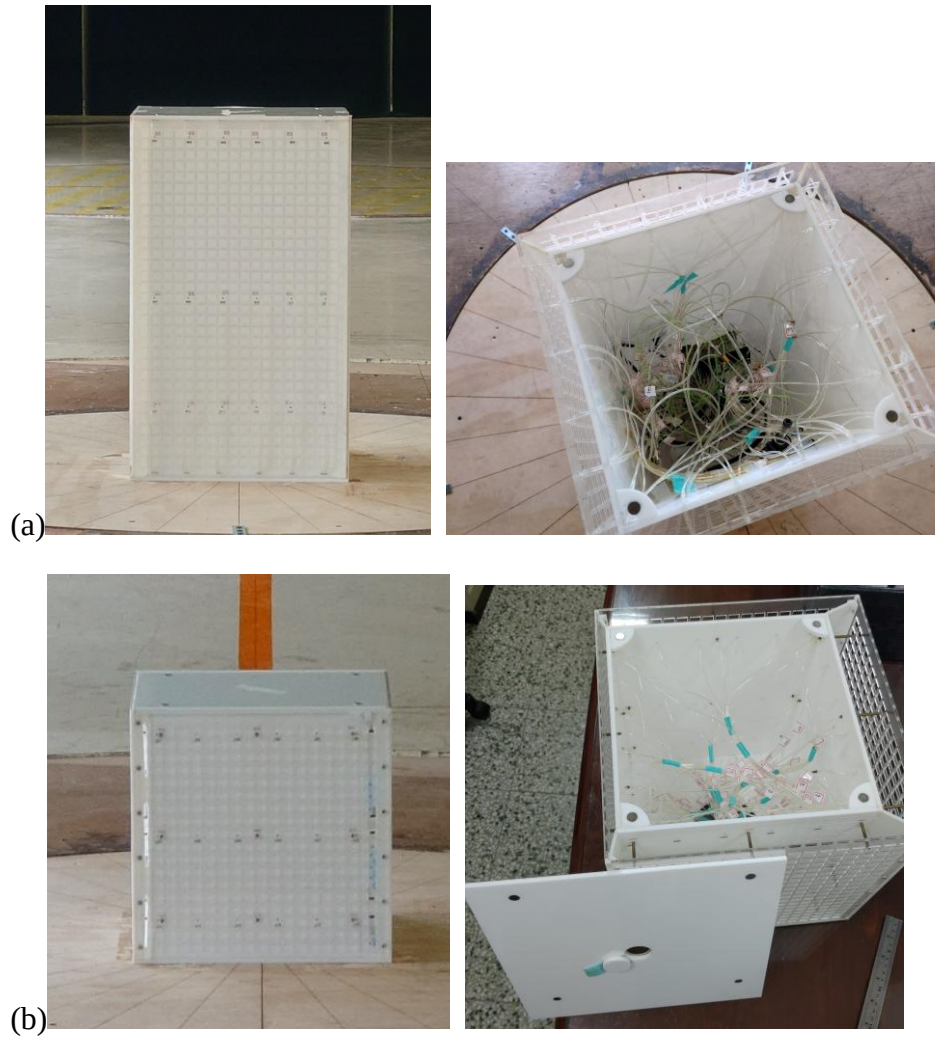


圖 3-2 第一階段風洞實驗模型 (a)模型 A (b)模型 B

資料來源：本研究拍攝

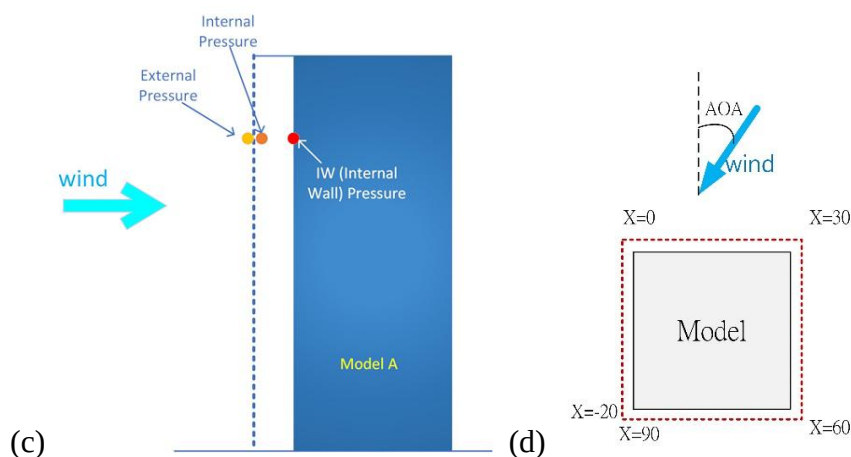


圖 3-2 第一階段風洞實驗模型，(a)模型 A (b)模型 B，(c)風壓量測位置定義，(d)風攻角與座標定義

資料來源：本研究繪製

3. 第二階段氣動力實驗：第二階段研究使用淡江大學位於新北市之高層風洞實驗室進行氣動力實驗，風洞斷面為寬 220 公分及高 180 公分，採用架設格柵及端板產生之均勻紊流場，進行具有多孔性外牆之建築物氣動力模型實驗研究。試驗時於風洞上游處架設格柵產生均勻紊流場，同時為降低風洞地面造成之邊界層影響，另於格柵下游架設離風洞地表 40 公分高之端板平面設置待測試體，試驗架設示意如圖 3-3，端板上方流場中心及橫風向左右各 16 公分流場剖面如圖 3-4 所示。

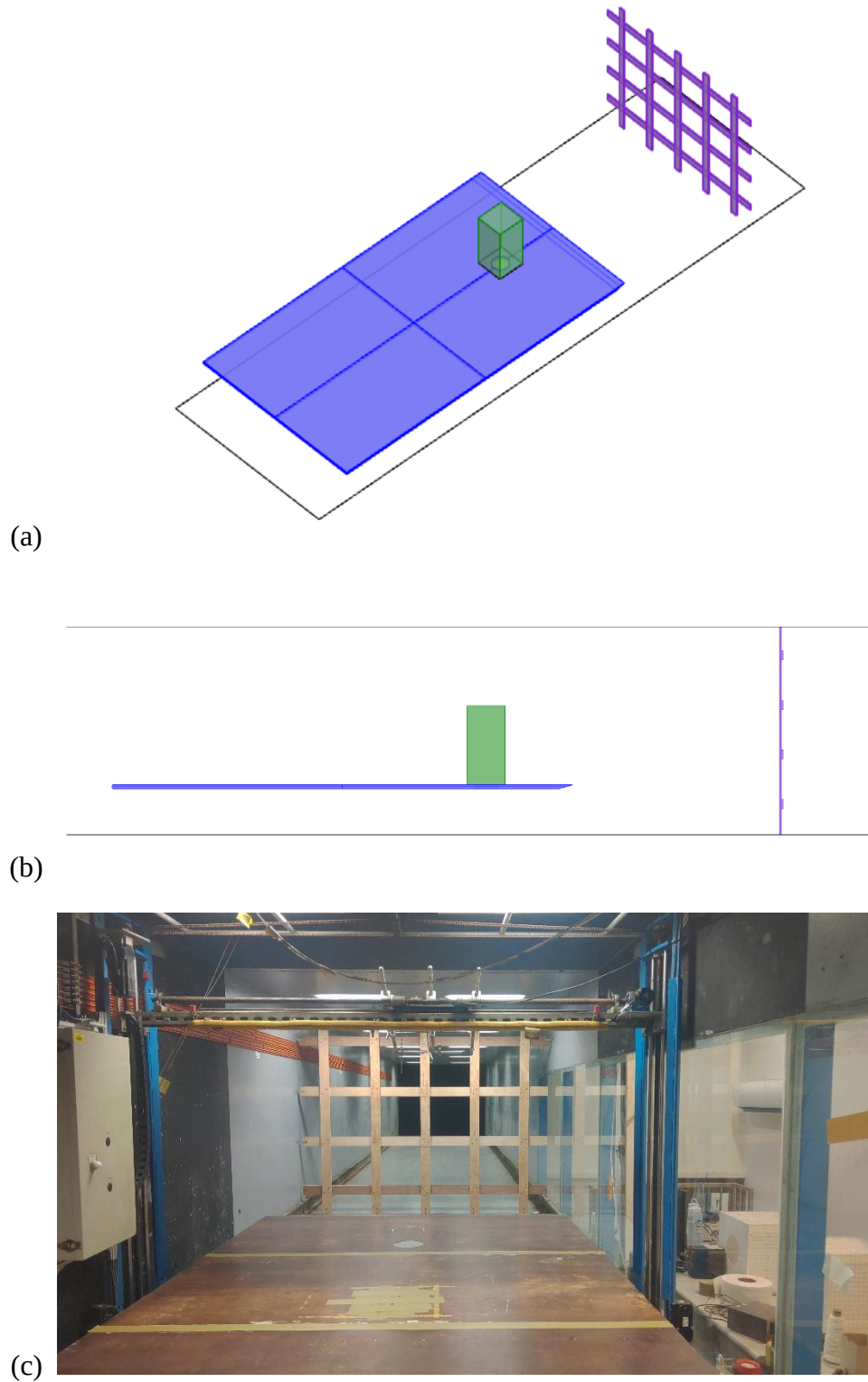


圖 3-3 風洞實驗格柵端板流場架設圖（示意圖右側為來流方向） (a) 示意等角視圖 (b)示意側視圖 (c)實際架設情形

資料來源：本研究繪製及拍攝

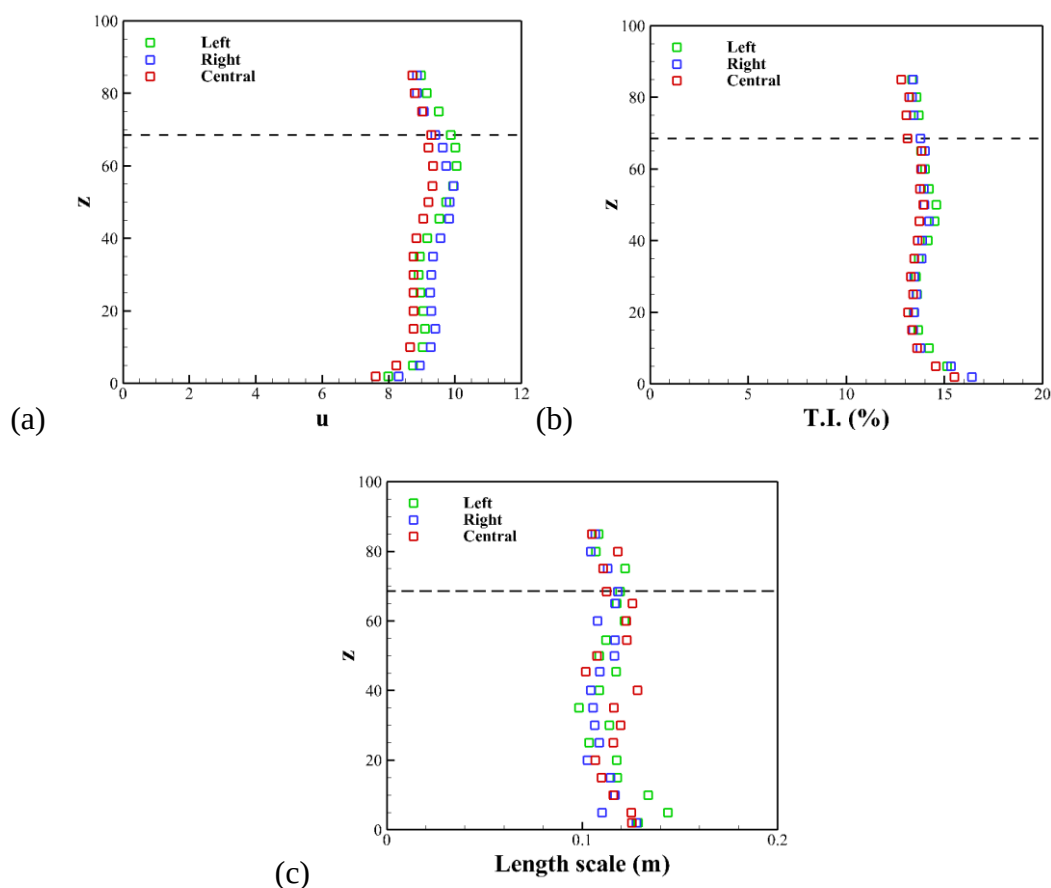


圖 3-4 第二階段風洞實驗流場剖面圖 (a)平均風速剖面 (b)紊流強度剖面 (c)積分尺度剖面

資料來源：本研究繪製

4. 第二階段氣動力實驗模型設計：第二階段進行完整系列之氣動力實驗，以方形斷面之矩柱體作為典型建物型態，製作模型如圖 3-5 所示，進行氣動力實驗研究。多孔性外牆模型設計的參數包括開孔率、內外牆間隙、側邊開放或連通性等條件。模型設計考慮與採用的大氣邊界層流場相似的長度縮尺作為模型幾何縮尺，並考慮斷面阻塞比，在不同風攻角變化下，其投影面積計算之阻塞比控制在 5% 以下。實際架設情形如圖 3-6 所示。

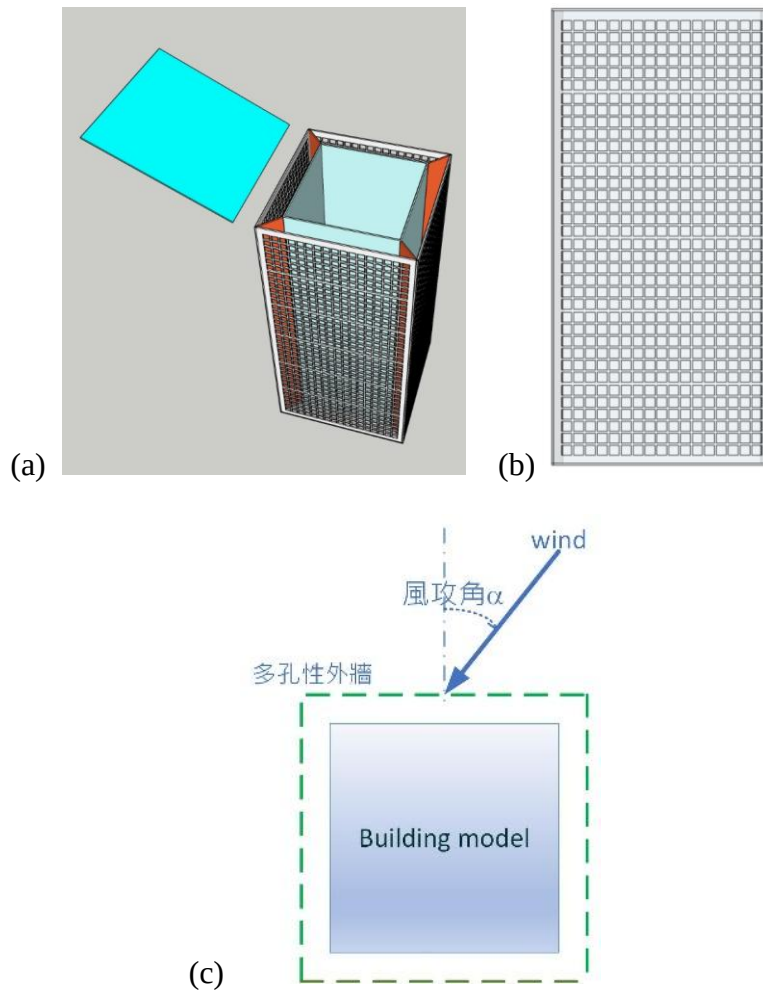


圖 3-5 第二階段多孔性外牆與建築物搭配之模型設計，(a)夾層內部構造，(b)模型外觀示意圖，(c)風攻角定義

資料來源：本研究繪製

表 3-2 第二階段氣動力實驗模型縮尺說明

長度縮尺	1/50		
實驗風速(模型高)	9.527		
紊流強度(%)	13		
模型高(m)	0.685	實場高(m)	34.25
速度縮尺	1/4		
時間縮尺	1/12.5		
採樣頻率	1/300		
換算實場 dt(sec)	0.0417		

資料來源：本研究整理

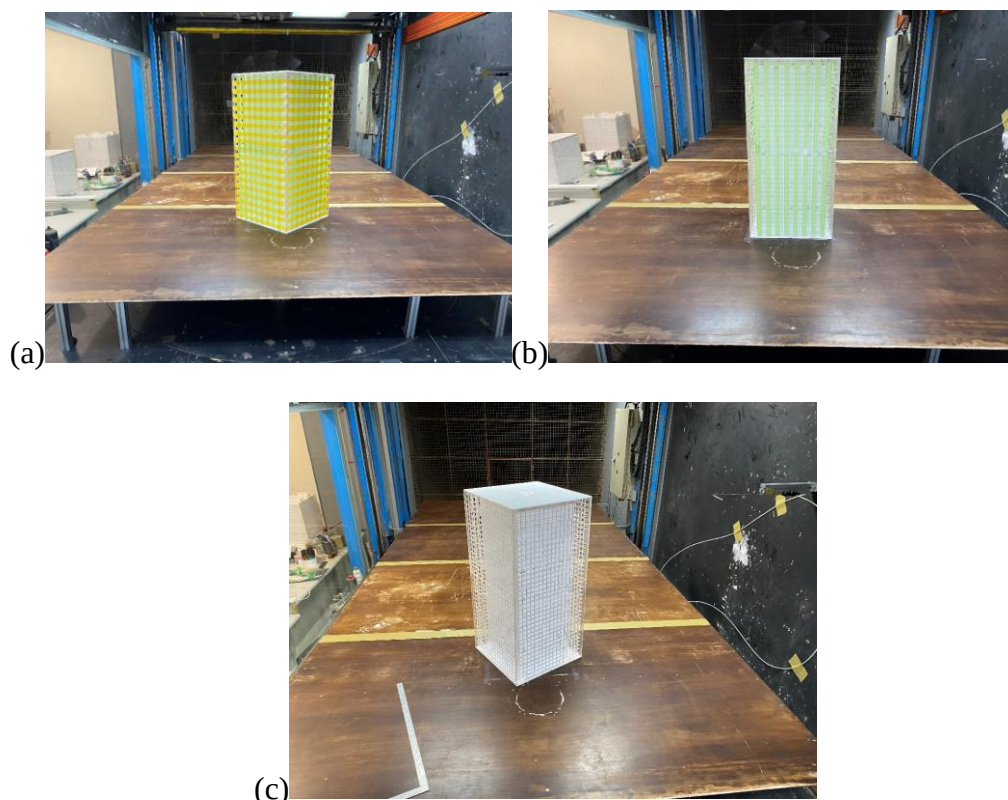


圖 3-6 第二階段實驗架設情形 (a)風攻角 45 度開孔率 15% (b)風攻角 0 度開孔率 32% (c)風攻角 30 度開孔率 60%

資料來源：本研究拍攝

5. 實驗參數變化：

- i. 風攻角包括 0~45 度的變化，變化間隔採用 15 度，共四種。
- ii. 多孔性外牆之開孔率變化包括 16、32、60%等三種，模型多孔性外牆將均布開孔以達到本研究最高開孔率，再利用均勻封閉部分開孔方式，降低開孔率。
- iii. 外牆間距變化：利用變化內部模型量體大小，以變化外牆與內部建築物間距，夾層間隔距離分別為 1、2、3 及 4cm，共有四個模型實驗。其變化將相當於實場的 0.5~2m 間變化，以 0.5m 為間隔。
- iv. 鄰邊聯通性：模型外牆夾層在轉角處設置隔板，隔板可

抽取，以變化連相鄰邊夾層的聯通性，產生連通及不連通兩種條件。

6.計畫進行中使用風洞試驗室相關試驗與量測儀器包括定溫流速儀(含熱膜探針流速計與相關設備)、流速率定儀、微壓壓力轉換器、微壓量測儀、A/D 轉換系統、電子式壓力掃描系統等。

氣動力模型之風壓量測：依我國建築物耐風設計規範對於外牆被覆物局部設計風壓的計算方式，需有多孔性外牆之外風壓係數與內風壓係數，其中外風壓係數配合陣風因子計算，內風壓係數則以極值風壓型態考慮，因此氣動力實驗量測資料必須有多孔性外牆內外風壓的同步資料，再利用極值理論推估設計風壓係數。本案模型利用壓克力版製作，設置多孔性外牆做為其外皮層，在多孔性外牆之內外側牆面與內部建物牆面均布風壓孔，利用本所實驗室現有的電子式壓力掃描器量測同步的風壓資料，實驗控制的條件以風攻角及紊流條件為主。風壓孔為布設考慮避免近地面層干擾及頂部三維分離流場干擾，將取用中央高度層區域布設風壓孔，並以此高度層之紊流強度與長度尺度作為流場特徵。氣動力實驗所用的風壓管線系統將盡量減少其長度，以減少管線對風壓擾動之扭曲。由於管線長度超過 30cm，因此在實驗進行之前需進行管線率定，以了解管線系統在不同頻率域對於風壓的影響，並製作率定函數以校正信號。為能推估合適的設計風壓係數，將配合我國規範對於設計風速的回歸期及取樣定義，決定實驗所需採樣時間與頻率。

第二節 資料分析

1.風壓係數計算

由實驗同步量測所得之數據可分三類，分別為建築物表面風壓孔、多孔性外牆內表面風壓孔、以及多孔性外牆外表面風壓孔。風壓量測時此三類資料同步量測，並先以模型高的來流平均風速壓作為約化分母，將所有風壓數據約化為風壓係數數據。瞬間風壓係數定義為

下：

$$C_p(t) = \frac{p(t) - p_s}{\frac{1}{2}\rho\bar{U}_H^2} \quad (14)$$

其中 ρ 為空氣密度， $\bar{U}_H$ 為模型高平均風速， p_s 為平均參考靜壓， $p(t)$ 為風壓孔所量測到的瞬間壓力。針對觀察模型於各種風攻角及設計參數下的基本氣動力特性，平均風壓係數跟擾動風壓係數可以定義如下：

$$C_p = \frac{\overline{(p(t) - p_s)}}{\frac{1}{2}\rho\bar{U}_H^2} \quad (15)$$

$$C'_p = \frac{\sqrt{\overline{(p(t) - p_s)^{2}}}}{\frac{1}{2}\rho\bar{U}_H^2} \quad (16)$$

其中 $\overline{(p(t) - p_s)}$ 為等同於實場十分鐘的分段風壓差的平均值，

$\sqrt{\overline{(p(t) - p_s)^{2}}}$ 為等同於實場十分鐘的分段風壓差的擾動值。

探討基本氣動力特性的時候，首先針對多孔性外牆受風力作用的觀察，可利用多孔性外牆內、外兩面壓力差來瞭解多孔性外牆本身所受風載重情形，並與實驗控制的因子相互比較，了解各因子對其風荷載的影響性。接著，針對建築物外牆表面受風力作用的觀察。實驗同時可獲得內部建築物牆面的風壓資料，並與外部流場、多孔性外牆表面風壓等資料進行比對，以評估對於內部建築物牆面之表面風壓擾動影響情形，包括平均風壓、擾動性風壓及極值風壓等性質，與建築物多孔性外牆之幾何條件相比較，評估各種不同多孔性外牆在減輕內部

建築物所受擾動風壓的能力。

2.設計風壓係數

本研究主要針對多孔性外牆進行設計風壓公式的探討，因此將上述所計算而得之風壓係數採用第二章第四節所述 Cook and Mayne(1980)所提出的甘保法，並搭配非超越機率 78%來決定設計風壓係數。由於本研究進行風洞實驗時，於各種設計案例時，累積了 18 段等同於實場十分鐘長度的數據。經過一秒移動平均的處理後，從此 18 段的數據中抓取最大值及最小值，即為代表實場十分鐘的極值風壓係數(包含最大風壓係數、最小風壓係數)。其中一秒移動平均的處理是基於我國主要是以一秒平均的陣風為原則。

針對抓取到的 18 個最大風壓係數及 18 個最小風壓係數，經由 18 個分段的平均風壓係數的平均值來決定應該採用前者還是後者進行甘保分布函數的擬合分析。若是最大風壓係數，則將最大風壓係數的甘保分布擬合找出，並尋找對應於非超越機率 78%的風壓係數作為設計風壓係數值。若是最小風壓係數，則先乘上負號後，再以甘保分布函數進行擬合，然後同樣尋找對應於非超越機率 78%的風壓係數後乘上負號，作為設計風壓係數值。

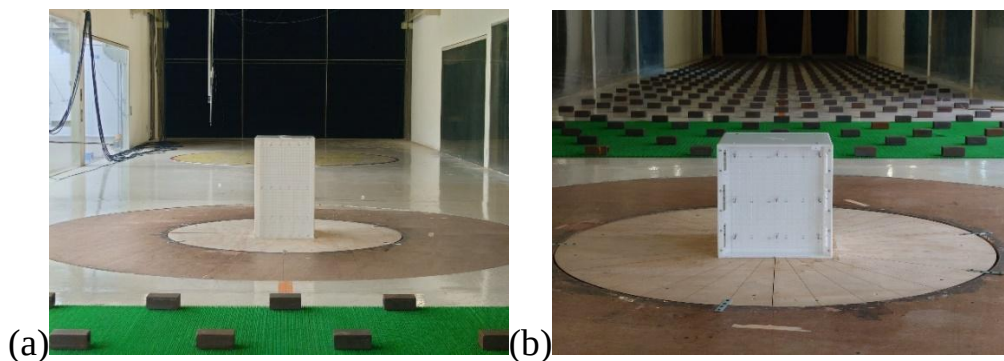
由於多孔性外牆的載重由作用於內、外牆面的淨風壓乘上代表面積後而得。因此本研究所設計的多孔性外牆在內、外牆面設置了對應位置的內、外風壓孔。故此，後續在探討多孔性外牆的設計風力公式，亦採用淨風壓係數來決定。值得一提的是，由於多孔性外牆外表面的最大瞬間風壓跟多孔性外牆內表面的最大瞬間風壓，不見得在同一瞬間發生，無法假設為完全相關，因此不能分開決定內、外表面的設計風壓係數後再相減而得。為了驗證此非完全相關的特性，後續實驗數據結果探討時，亦納入各分析結果來做比對，但並不納入設計風力公式考量。

第四章 研究成果與檢討

第一節 第一階段氣動力實驗

第一階段實驗工作重點在於釐清模型設計及實驗規劃之方向，模型包括模型 A 及模型 B 兩個，實驗安置情形及風攻角定義等如圖 4-1 所示。模型 A 以驗證多孔性外牆各部位風壓量測技術及建立資料分析流程為目的，採固定多孔性外牆夾層間隔距離設計。模型 A 可同時量測多孔性外牆外風壓、背面風壓與內部建物立面表面風壓等三個區為風壓資料。模型四個面向夾層間隔固定為 2 公分，安裝之多孔性外牆具有 64% 的開孔率，再藉由調整封閉部分開口而有 32% 及 16% 等開口率。模型 B 氣動力實驗以驗證多孔性外牆夾層間隔內風壓分布特性與間隔距離之關聯性，模型 B 可同時量測不同夾層間距下在多孔性外牆背面風壓與內部建物立面表面風壓。模型四個面分別設置 1~4 公分的夾層間距，安裝之多孔性外牆具有 64% 的開孔率，再藉由調整封閉部分開口而有 32% 及 16% 等開口率。模型 A 及模型 B 風壓量測部位如圖 4-2 所示。

氣動力實驗採用 C 地況(流場剖面如圖 3-1 所示)進行量測，參考風速採用模型頂部高度之平均風速，採樣時間 900 秒，採樣頻率為 256Hz。



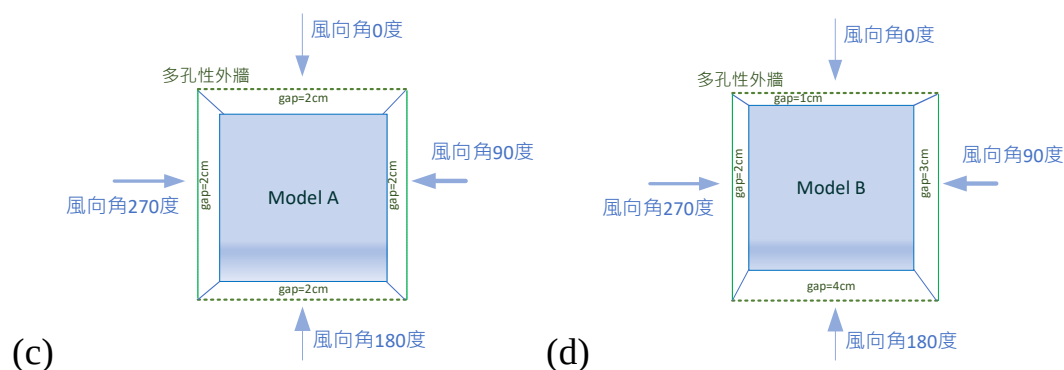


圖 4-1 第一階段氣動力實驗，(a)模型 A，(b)模型 B，(c)風攻角定義
資料來源：本研究拍攝及繪製

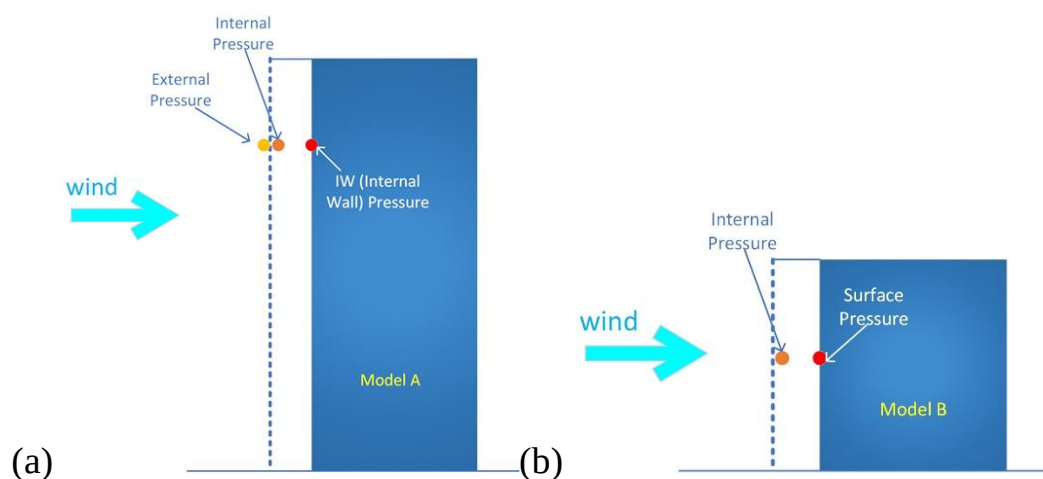


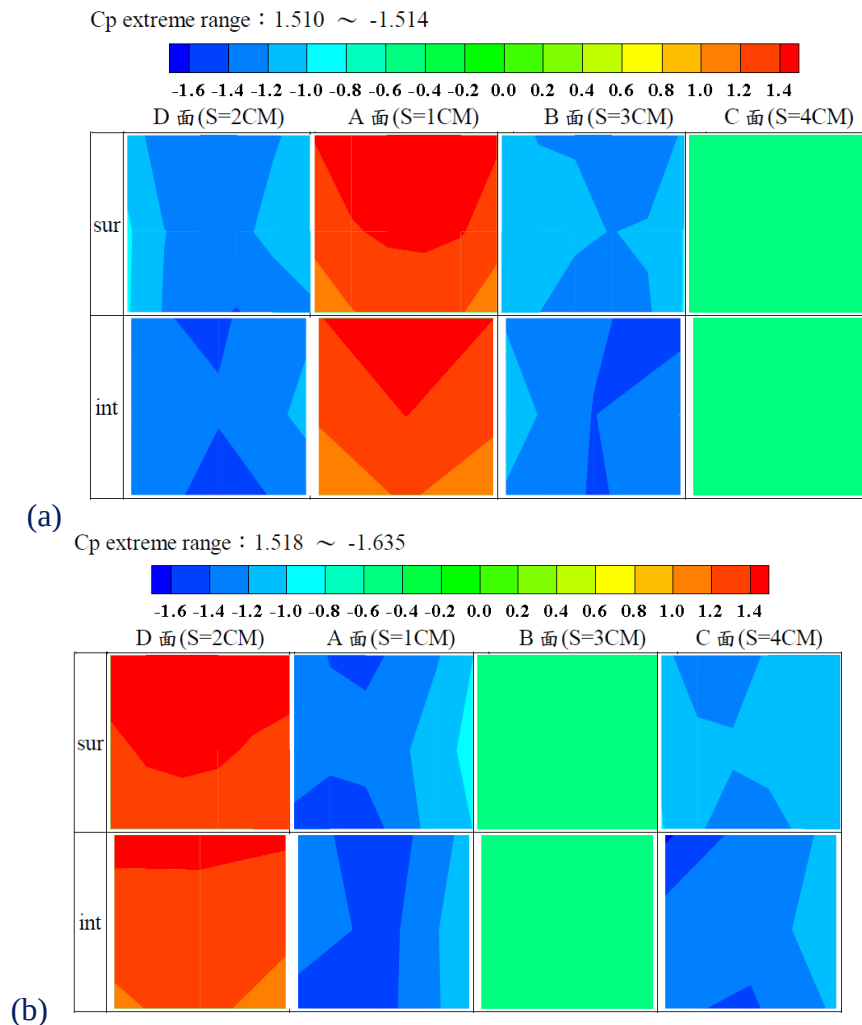
圖 4-2 第一階段氣動力實驗，(a)模型 A 風壓量測位置，(b)模型 B 風壓量測位置
資料來源：本研究繪製

一、多孔性外牆夾層內壓梯度檢核

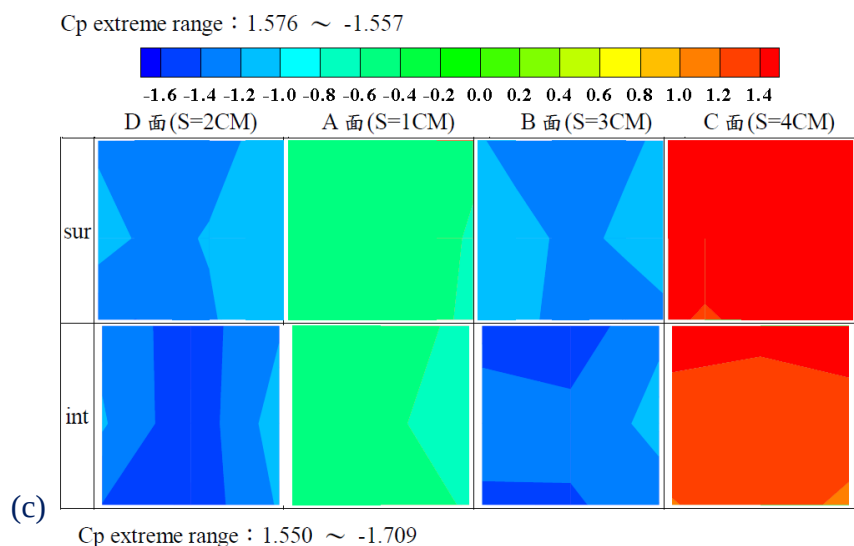
模型 B 用於驗證多孔性外牆夾層間隔內風壓分布特性與間隔距離之關聯性，實驗時依次量測以旋轉模型方式使具有 0、90、180、270 度等風攻角，使各不同夾層間距的面向依序成為迎風面，量測所得之時序列資料並計算其尖峰風壓係數，如圖 4-3 所示。

由圖 4-3 顯示，不同夾層間距的面向在迎風面條件下時，間隔距離由 1cm 變化至 4cm，多孔性外牆背面風壓與內部建物立面表面風壓的尖峰值分布狀況均類似，顯示在孔隙比達 64%條件下，間距

1~4cm 夾層空間內部仍能保持良好的均勻性，由外牆到內牆面無明顯的壓力梯度存在，有助於多孔性外牆風荷載及內牆所受風壓資料採集的簡化。由模型面上尖峰風壓分布在所採用的各風攻角條件下，立面上整體分布情形無劇烈變化。進一步觀察，模型 B 中央帶寬(central band)區域在比較不同間距、連通與否等條件下的孔性外牆背面風壓與內部建物立面表面風壓的尖峰值狀況，圖面上所示 gap 之公分數值，代表夾層間距之距離，同時於圖名說明不同面相夾層是否連通，如圖 4-4 及圖 4-5 所示，其中不同量測位置的定義如圖 4-2 所示。不同夾層間距其多孔性外牆背面風壓與內部建物立面表面風壓的尖峰值均類似，隨多孔性外牆之開孔率由 64% 變化至 16%，內風壓係數的變化亦不大，顯示在夾層空間中，內風壓即使在大開孔率條件下，仍能保有均勻性，且未有明顯的壓力梯度變化存在，在評估多孔性外牆所受風載重時，內部建築物表面風壓資料可視同外牆之背風壓資料其誤差應不大。



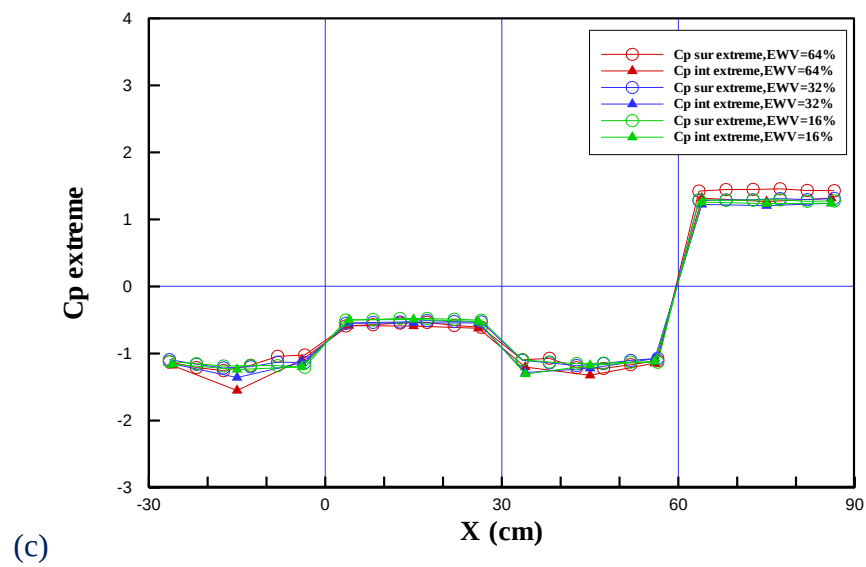
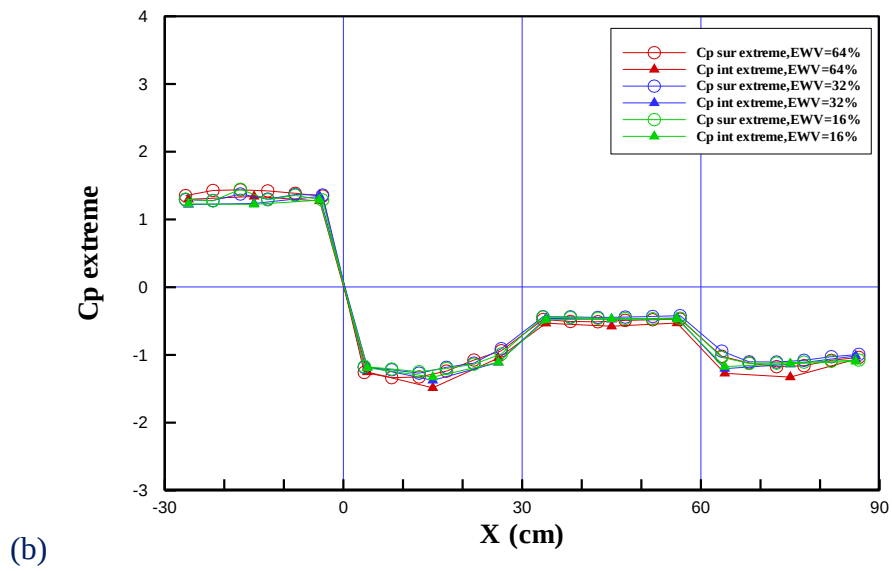
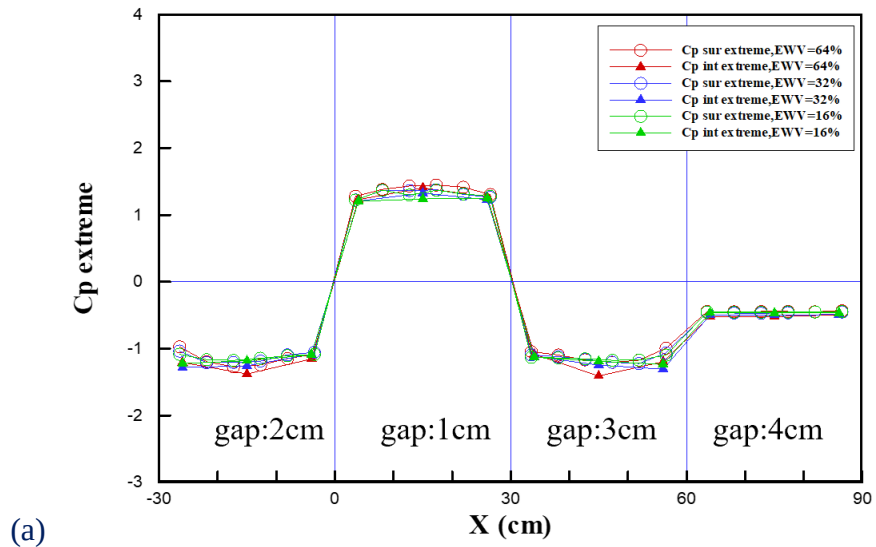
建築物多孔性外牆之受風作用特性研究



備註：多孔性外牆背面(sur)尖峰風壓值、內部建物表面尖峰風壓值(int)

圖 4-3 模型 B，開孔率 64%，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆背面尖峰風壓值(sur)及內部建物表面尖峰風壓值(int)分布情形，風攻角 (a)0 度，(b)90 度，(c)180 度，(d)270 度。

資料來源：本研究繪製



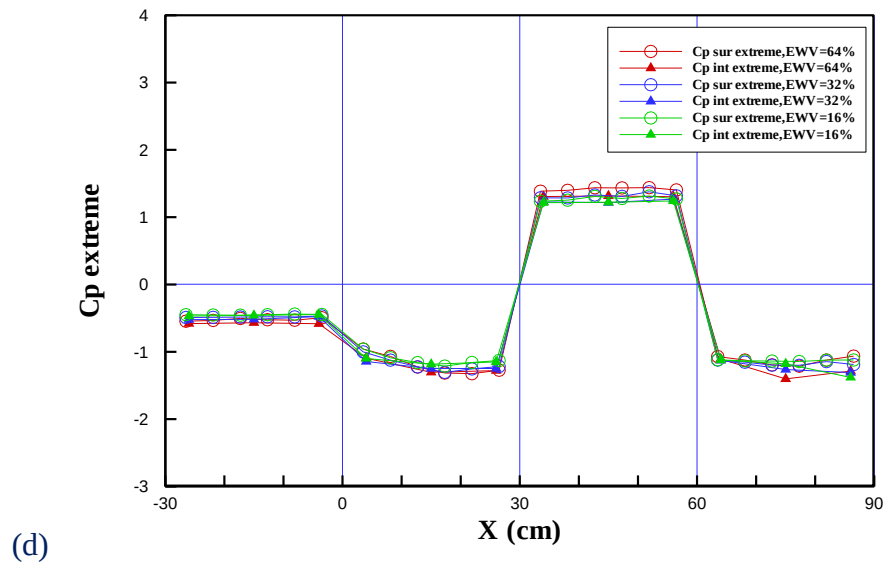
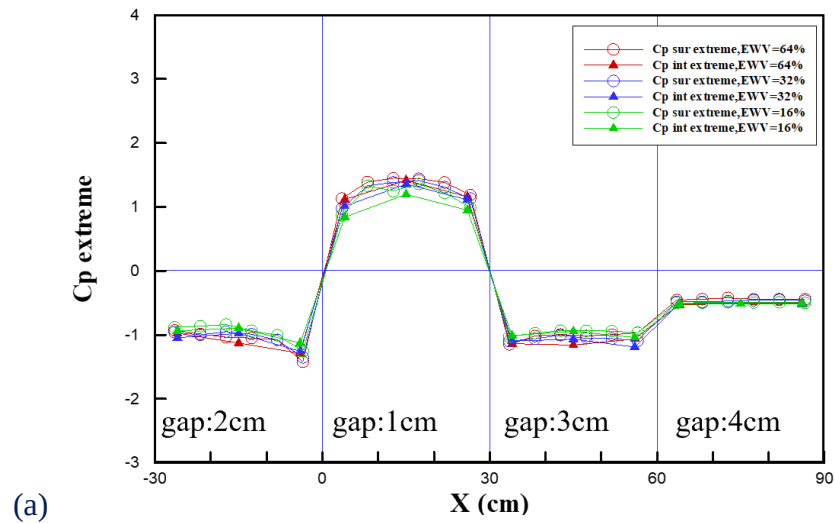


圖 4-4 模型 B，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆背面尖峰風壓值(sur)及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)90 度，(c)180 度，(d)270 度。

資料來源：本研究繪製



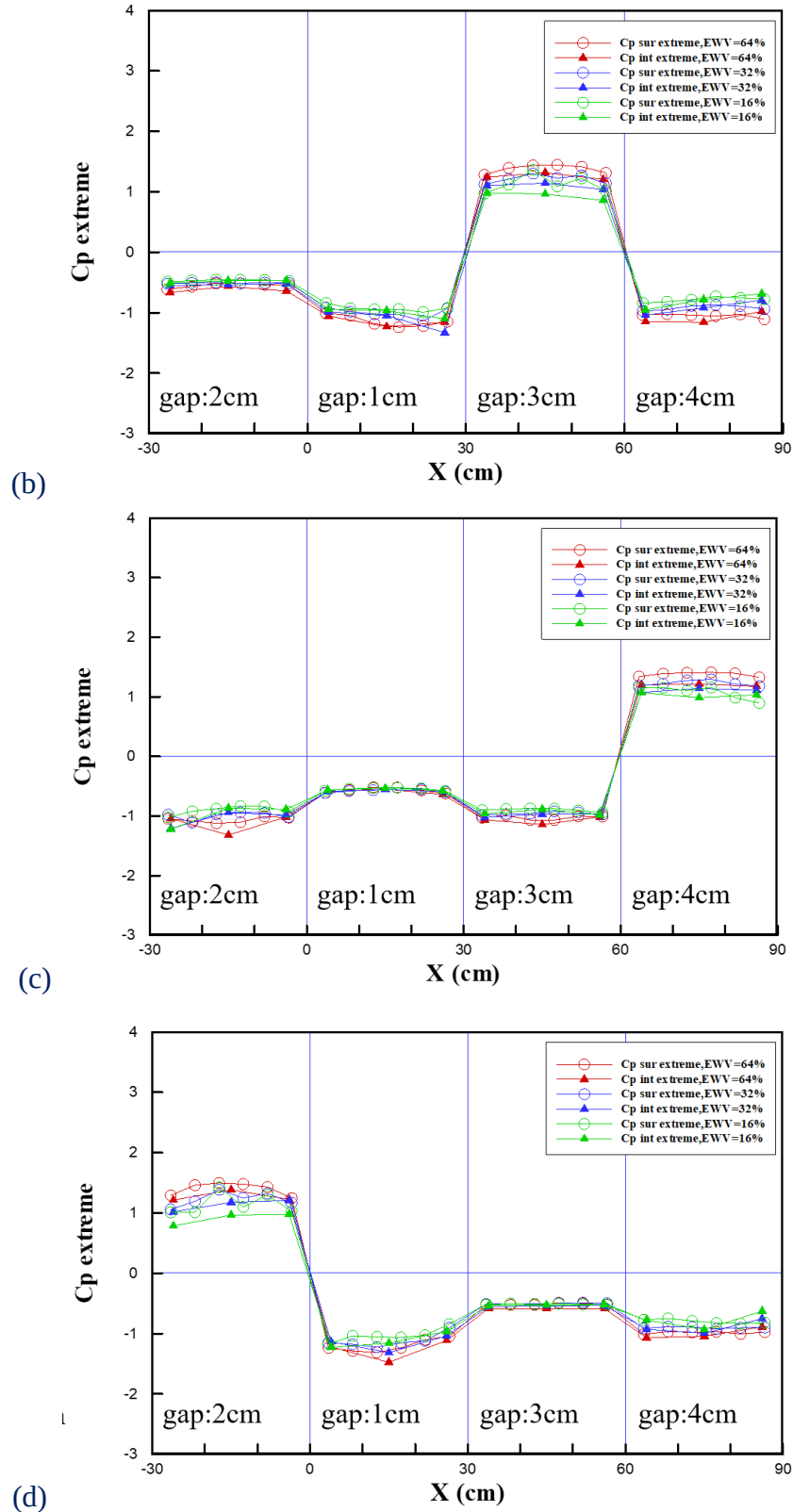


圖 4-5 模型 B，相鄰夾層空間連通，多孔性外牆背面尖峰風壓值(sur)及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)90 度，(c)180 度，(d)270 度。

資料來源：本研究繪製

二、多孔性外牆之外風壓係數變化

使用模型 A 氣動力實驗，進行有關多孔性外牆外風壓係數的初步探討，並建立工作程序，模型 A 固定夾層間距為 2cm，四面夾層空間隔板可選擇置入或移出，以控制相鄰夾層連通性。多孔性外牆之孔隙率為 64%，並透過封住部分開孔方式變化出 32%及 16%的開孔率。風壓孔布設位置包括多孔性外牆之內外兩面及內部建物之立面牆面，因此可同時量測多孔性外牆之內外面風壓及內部建物立面風壓分布。

1. 多孔性外牆之平均風壓係數變化

本研究量測的風壓位置包括多孔性外牆外部(ext)、背面(int)及內部建物表面(IW)等三個區位，個別位置如圖 4-2 所示。首先取風攻角 0 度時，不同區位的平均風壓係數分布如圖 4-6 所示，實驗個案包括相鄰夾層連通與否的變化，如圖 4-6(a)所示，相鄰夾層空間不相連通時，多孔性外牆之外部(ext)、背面(int)及內部建物立面(IW)等區域，模型中央高度平均風壓係數分布均相當類似，顯示多孔外牆夾層內風壓僅直接反映該面向之外部風壓，外部風壓透過開孔進入夾層，因此內外壓力接近一致，顯示多孔外牆處於近似等壓狀態。如將相鄰夾層間的隔板去除，使相鄰夾層空間聯通，則如圖 4-6(b)所示，多孔性外牆之外部平均風壓係數與相鄰夾層不相連通的狀況是相同的，而夾層內風壓的平均風壓係數則明顯下降，以迎風面最為明顯，開孔率越低擇內壓的平均風壓係數下降越多，同時多孔性外牆之背面(int)及內部建物立面(IW)兩區域的平均風壓係數相當一致，顯示夾層空間內壓力分佈是一致的，僅開孔率達 60%以上時，上游角隅區有差異，研判因角隅分離流透過鄰近開孔直接穿越，而產生與內牆面風壓的差異。

由於模型橫斷面為正方形，因此風攻角由 0 度變化到 45 度，其餘情形為對稱。風攻角對於多孔性外牆外部(ext)、背面(int)及內部建物表面(IW)等三個區位平均風壓係數的影響如圖 4-7 所示，採用相鄰夾層連通的實驗結果，風攻角為零度時，迎風面向夾層內壓的平

均風壓係數較其他風攻角條件下略高，且其側風面上游角隅的風壓係數負值亦較其他風攻角為低。隨風攻角的增加，可見夾層內壓有小幅回升的狀況，在外風壓不受開孔影響的考量下，夾層內風壓的回昇，對於多孔性外牆的風載重應屬減輕的趨勢。變化風攻角實驗成果顯示，隨風攻角的增加，各面向正負風壓變化的趨勢仍類似，但其變化幅度有明顯縮小，因此對於較臨界的風壓係數討論，顯然仍以風攻角 0 度時的情況為主導。風荷載作用較為劇烈的應為風攻角零度作用條件下，如要評估具備多孔外牆建築物所受風載重，以零度風攻角情況下考慮，應屬保守。

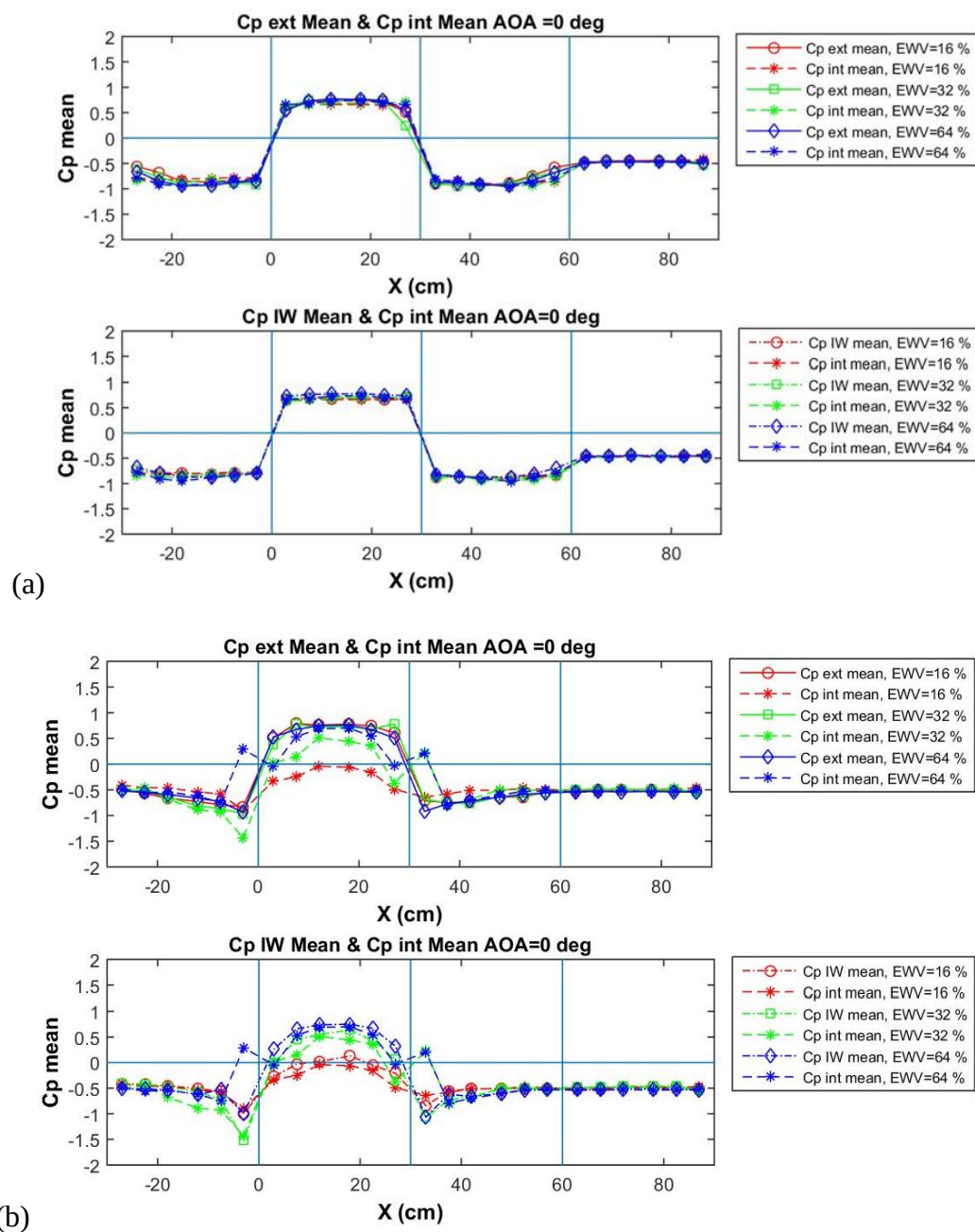
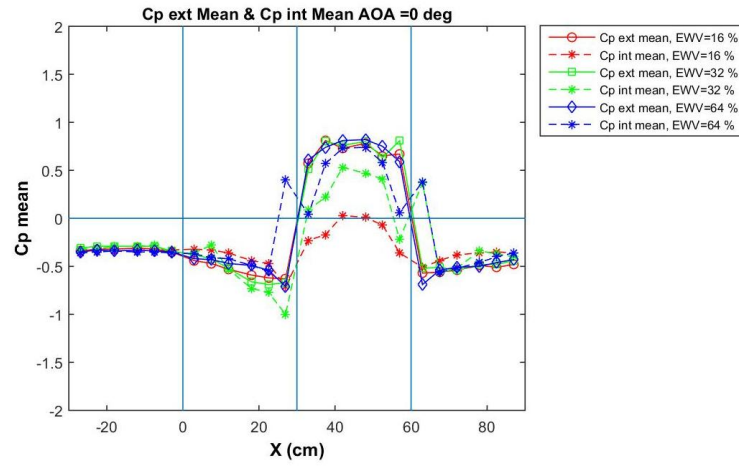
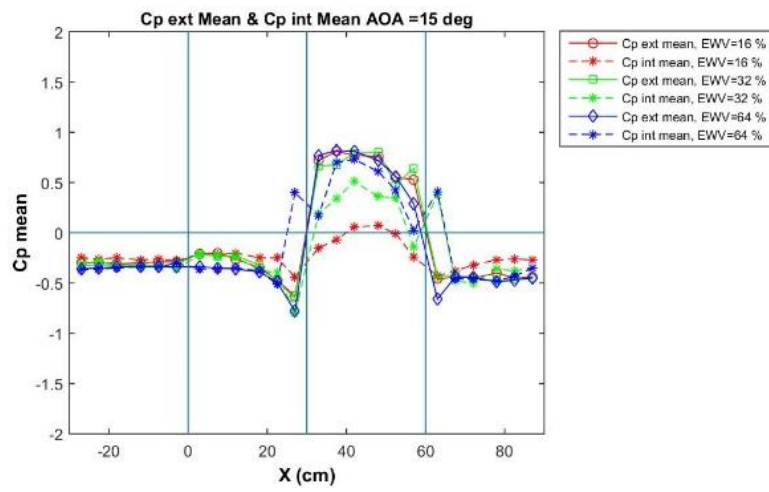


圖 4-6 風攻角 0 度，多孔性外牆外部(ext)、背面(int)及內部建物表面(IW)於中間高度帶寬之平均風壓係數分布情形，相鄰夾層空間(a)不連通，(b)連通。

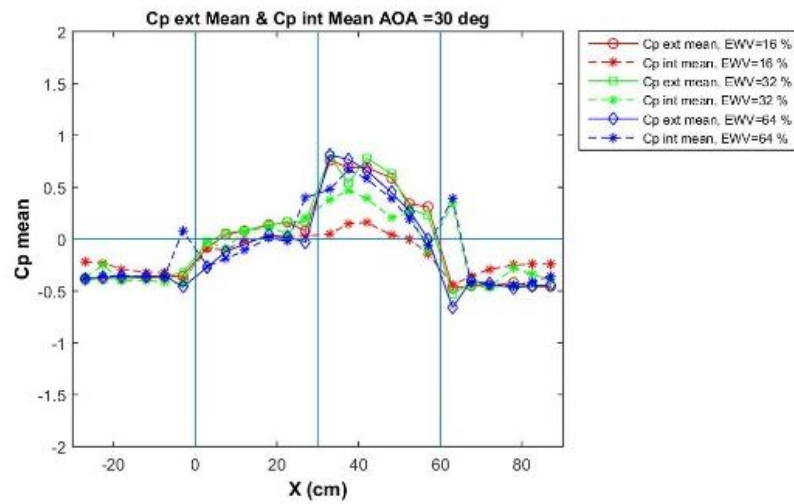
資料來源：本研究繪製



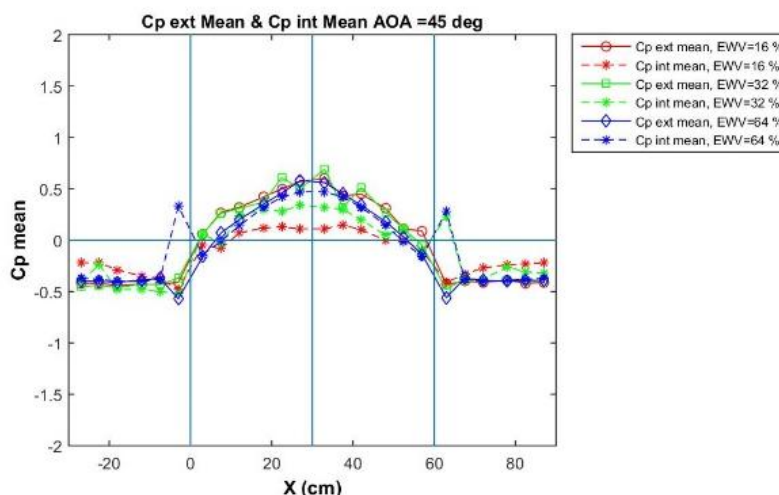
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-7 多孔性外牆外部(ext)、背面(int)於中間高度帶寬之平均風壓係數分布情形，相鄰夾層空間連通，風攻角(a) 0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。

資料來源：本研究繪製

在淨風壓的變化方面，多孔性外牆所受淨風壓採用外風壓減背面風壓，計算時以量測之歷時資料相減，再計算其統計值。風攻角為零時，多孔性外牆所受之平均淨風壓係數如圖 4-8 所示，在相鄰夾層空間不相連的情形下，平均淨風壓係數在各面向均接近零，與圖 4-6(a)顯示相同趨勢，多孔性外牆在各不同面向，外風壓與背面風壓兩者相當接近，因此其平均淨風壓係數均接近零值。在相鄰夾層空間均相連的情形下，平均淨風壓係數在各面向變化，如圖 4-8(b)所示，以迎風面上多孔性外牆有較高的正值淨風壓係數，隨開孔率的提高，其平均淨風壓係數呈現下降的趨勢，但角隅位置仍有較高的正值。其他面向平均淨風壓係數為較接近零的負值，開孔率達到 64%時，其他面向平均淨風壓係數接近零值。顯示多孔性外牆在高開孔率時，相鄰夾層連通，其所受風荷載，仍趨近於等壓狀態，而相鄰夾層不相連狀況則均為等壓狀態。圖 4-8(b)亦顯示迎風面上多孔性外牆背面平均風壓係數隨開孔率的變化趨勢，與平均淨風壓係數的變化趨勢相反，因內壓隨開孔率的增加而上升並接近外壓值，外壓不受多孔外牆影響條下，隨開孔率提高，淨風壓逐漸下降趨近零值。

風攻角為 45 度時，多孔性外牆所受之平均淨風壓係數如圖 4-9 所示，在相鄰夾層空間不相連的情形下，如圖 4-9(a)所示，平均淨風壓係數在各面向均接近零，但角隅區域有較低的負值平均淨風壓係數。圖 4-9(b)為夾層相連通的狀況，迎風角隅平均淨風壓係數有較高的正值，其餘面向則接近零值，且在開孔率 64%時，下游角隅淨風壓係數有較低的負值，應為高開孔率有氣流直接穿越夾層現象的影響。由圖 4-8 及圖 4-9 的變化顯示，多孔性外牆所受風荷載主要受到夾層內壓變化影響，其外部風壓呈現相似的分布，但受到開孔率、夾層連通性等影響，內風壓的改變則直接反映在淨風壓的變化。

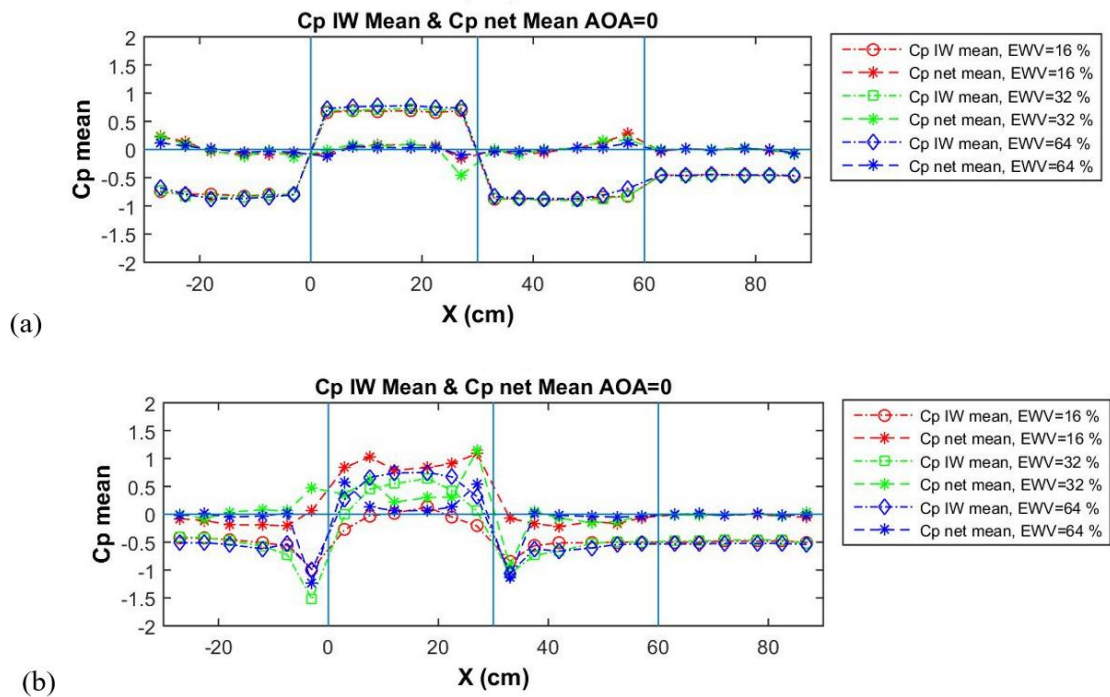


圖 4-8 四面向平均風壓係數分布，風攻角零度，外牆淨風壓(net) 及內牆(IW)風壓平均風壓係數，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通

資料來源：本研究繪製

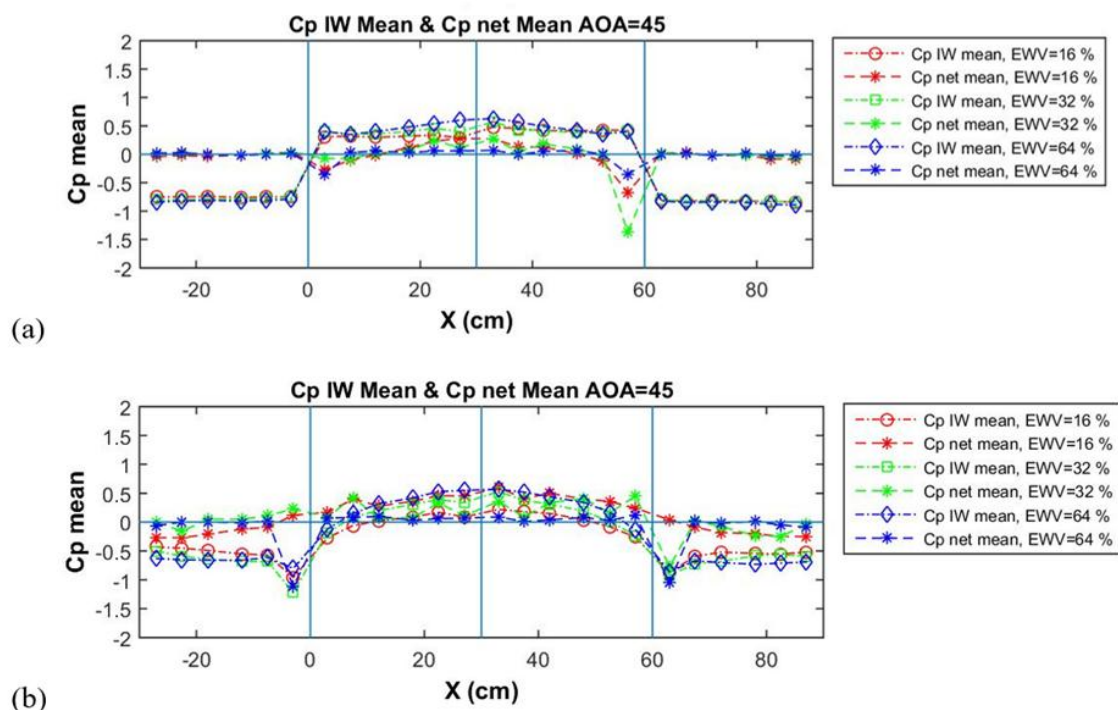


圖 4-9 四面向平均風壓係數分布，風攻角 45 度，四面夾層相互連通，平均風壓係數包括外牆外風壓(ext)、背風壓(int)及內牆(IW)風壓，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通

資料來源：本研究繪製

2. 多孔性外牆之尖峰風壓係數變化

由前述討論可知，風攻角為零時有較強的風荷載發生，以 Mayne & Cook 建議的極值推估方法，採用超越機率 78%，並取 18 段實場十分鐘風壓資料進行推估尖峰風壓係數，結果如圖 4-10 所示。封閉夾層連通時，如圖 4-10(a)所示，迎風面尖峰風壓係數為正值，且與開孔率變化無關，其值約為 1.1。而側風面尖峰風壓係數分布亦接近，其值約為-1.5，背風面尖峰風壓係數約為-0.8。夾層不連通情形下，個面尖峰風壓係數外部與內部差異約 0.1，代表多孔性外牆風荷載不大。開放夾層連結，如圖 4-10(b)所示，多孔性外牆之外部尖峰風壓分布情形與開孔變化無關，而內壓的尖峰風壓係數變化與其內壓的平均風壓係數變化趨勢是類似的，但變化幅度更大，因此其設計風載重較大。

計算淨風壓係數時係以歷時資料直接計算各瞬時的淨風壓，再

計算其統計值；而個別的外部與內部尖峰風壓係數，則由外部風壓資料與內部風壓資料分別推估，淨風壓尖峰風壓係數與將外部尖峰風壓減內部尖峰風壓係數的差異比較如圖 4-11 所示，採用相鄰夾層相互連通的情形進行比較，可見風攻角 0 度與風攻角 45 度，在各種開孔率的條件下，淨風壓尖峰風壓係數與將外部尖峰風壓減內部尖峰風壓係數的差異均不大，因夾層內部風壓變化主要來自外部氣流進入，本研究開孔率範圍較高，外部氣流容易進入夾層空間，兩者來自相同來源而具有甚佳的相關性，因此內外風壓相減結果與淨風壓均甚為接近，因此推估多孔外牆所受風荷載時，掌握夾層內部風壓變化趨勢，配合外部風壓資料，應可有效加以推估。

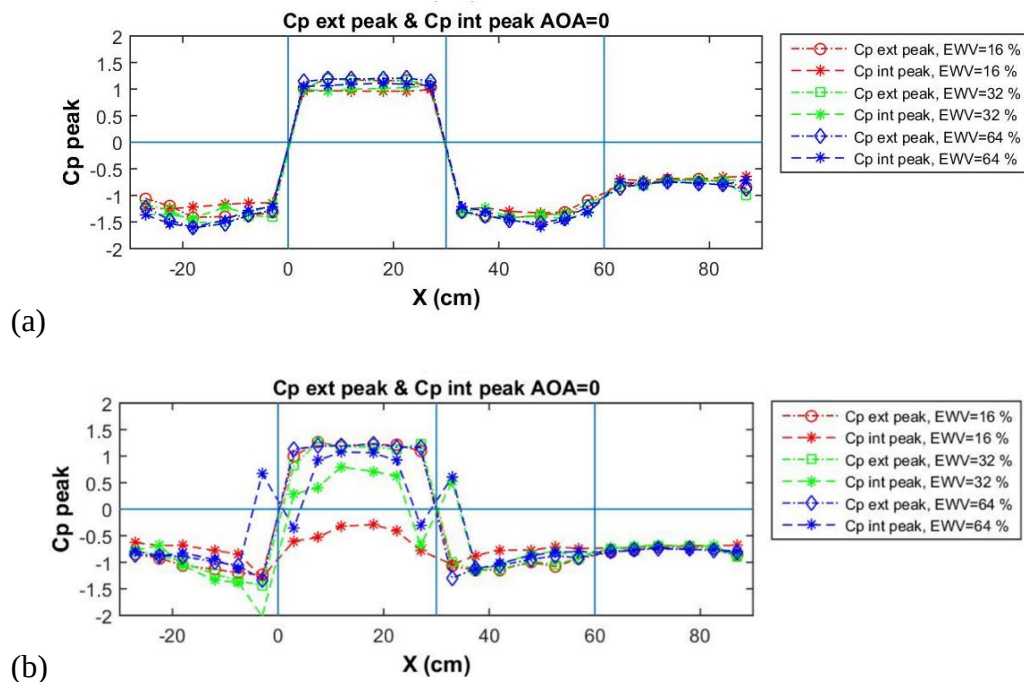


圖 4-10 四面向，外牆外風壓(ext) 及內風壓(int)尖峰風壓係數分布，風攻角零度，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通

資料來源：本研究繪製

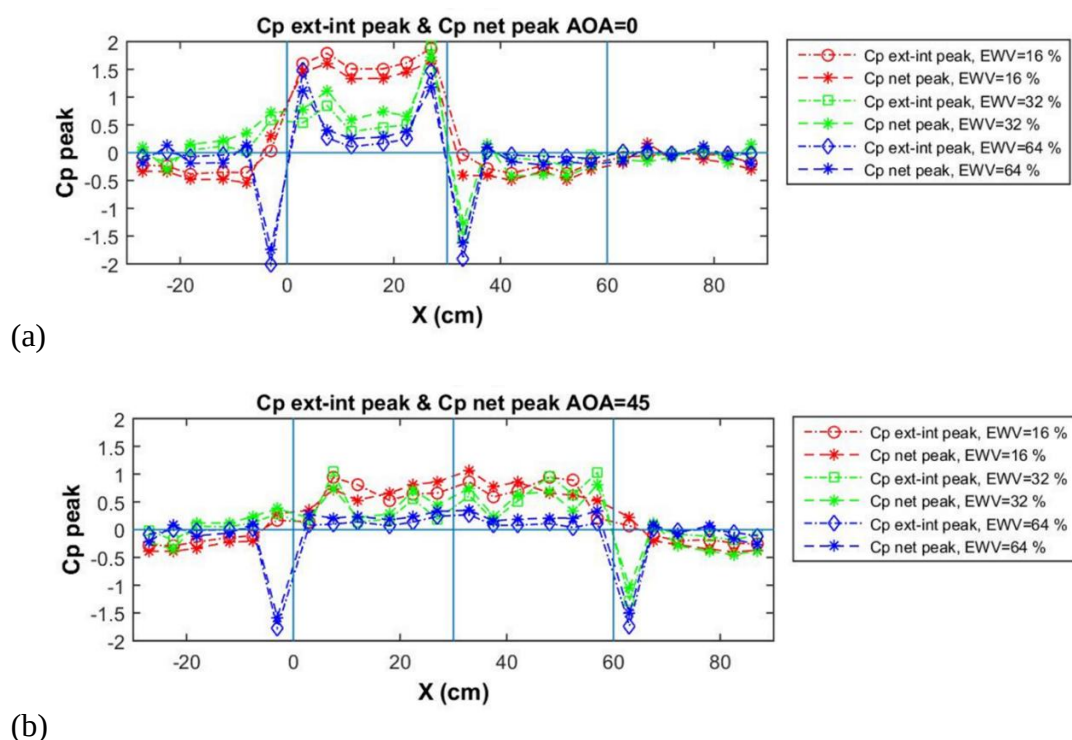


圖 4-11 四面向平均風壓係數分布，四面夾層相連通，多孔外牆內外尖峰風壓係數差值與外牆尖峰淨風壓係數分布，風攻角(a) 0 度，(b)45 度。

資料來源：本研究繪製

由前節關於模型 B 的討論顯示，夾層空間內壓力的分布是均勻的，可視作無壓力梯度的變化。量測所得量測多孔性外牆之內外面風壓及內部建物立面風壓立時資料，利用 Mayne & Cook(1980)建議的極值推估程序，並參考我國建築物耐風設計規範中有關基本設計風速的定義回歸期及取樣定義估算尖峰風壓係數，取中央帶寬之尖峰風壓係數進行討論，結果如圖 4-12~圖 4-13 所示。

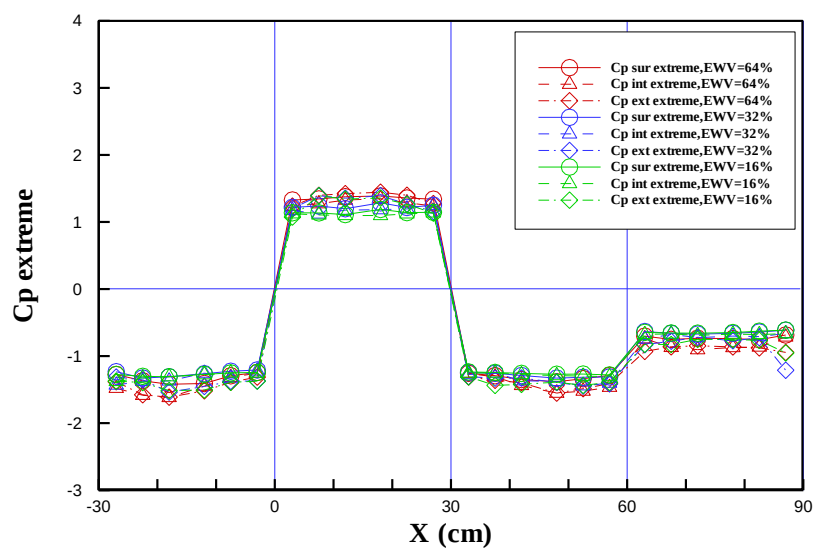
首先將相鄰夾層之隔板置入，則各面向均為獨立的夾層空間，如圖 4-12 所示，圖 4-12(a)為風攻角 0 度時的尖峰風壓係數，多孔性外牆之外部風壓尖峰值(ext)在三種開孔率變化下，均呈現一致的分布狀況，顯示多孔性外牆的外部尖峰風壓係數，未隨開孔率的變化而改變。而多孔性外牆的背面尖峰風壓係數(sur)及內部建物立面上尖峰風壓係數(int)則兩者均相當一致，此特徵與模型 B 量測的結果亦相符合。圖 4-12(a)顯示多孔性外牆的背部尖峰風壓係數(sur)及內部建物立面上尖峰風壓係數(int)正值風壓係數有隨開孔率下降而小幅下降，而

負值風壓係數則隨開孔率下降而小幅回升，其變化的幅度約為 10%。

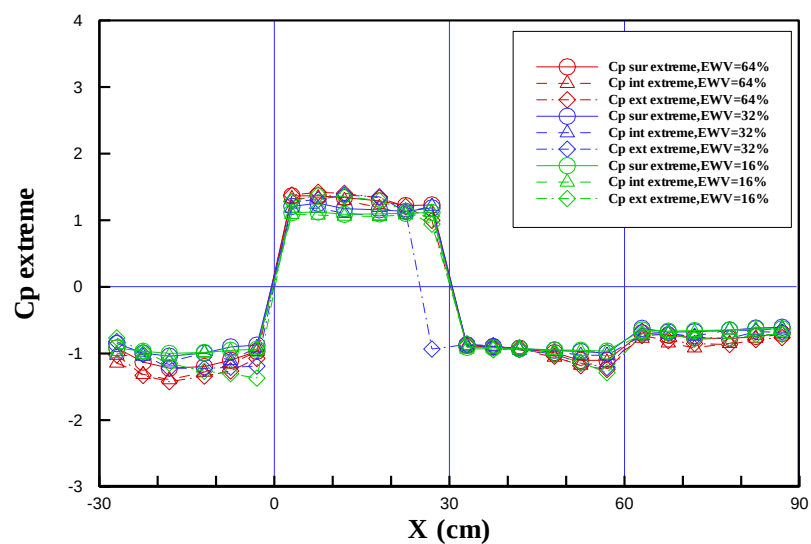
將相鄰夾層間的隔板取出，各面向中央帶寬的尖峰風壓係數分布如圖 4-13 所示，由圖 4-13(a)顯示，外部尖峰風壓係數在不同開孔慮的條件下均保持一致，顯示本研究採用的開孔率範圍，外部風壓的尖峰風壓係數並未改變。而多孔性外牆背面的尖峰風壓係數(sur)及內部建物立面尖峰風壓係數(int)兩者顯示為相互一致，後續實驗分析中兩者可擇一使用。以迎風面而言，兩項尖峰內風壓係數均隨開孔率的減少而呈現下降的趨勢，且變化幅度甚為明顯。側風面的負風壓隨開孔率的減少而小幅回昇，與封閉各面夾層連通的模型氣動力實驗結果相同。背風面則顯示內外風壓係數均類似，顯示背風面區域多孔外牆有進入等壓狀態的可能性。

變化風攻角，實驗成果如圖 4-13(b)~(d)所示，隨風攻角的增加，各面向正負風壓變化的趨勢仍類似，但其變化幅度有明顯縮小，因此對於較臨界的風壓係數討論，顯然仍以風攻角 0 度時的情況為主導。

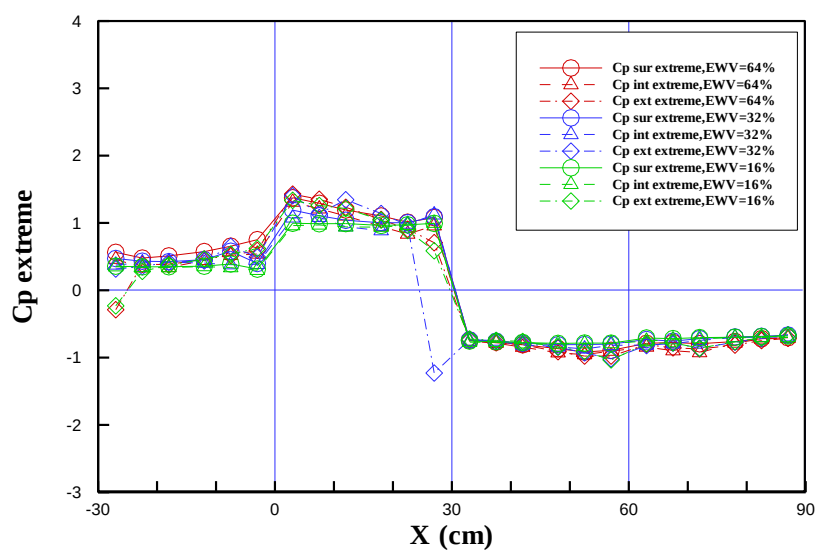
建築物多孔性外牆之受風作用特性研究



(a)



(b)



(c)

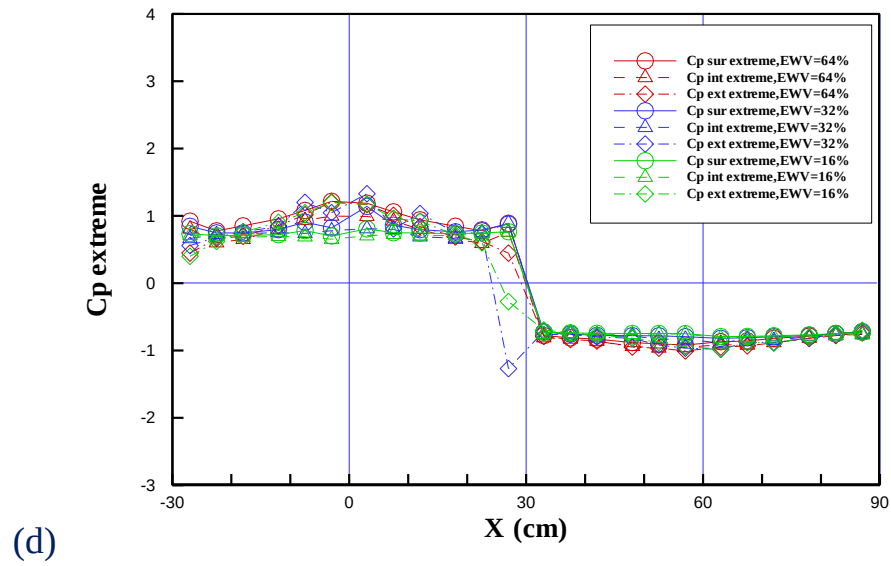
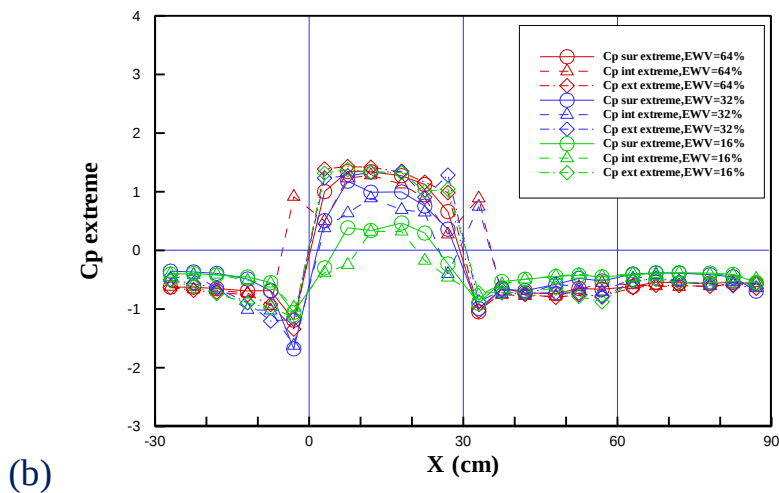
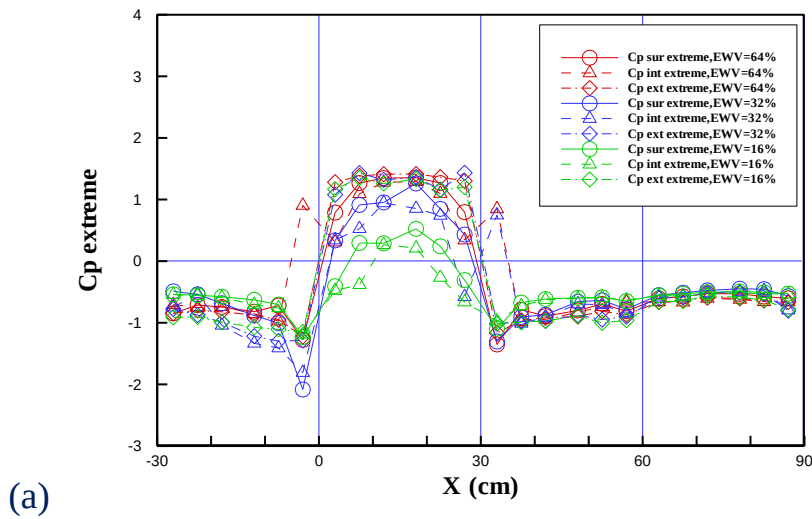


圖 4-12 模型 A，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆外部(ext)、背面(sur)尖峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。

資料來源：本研究繪製



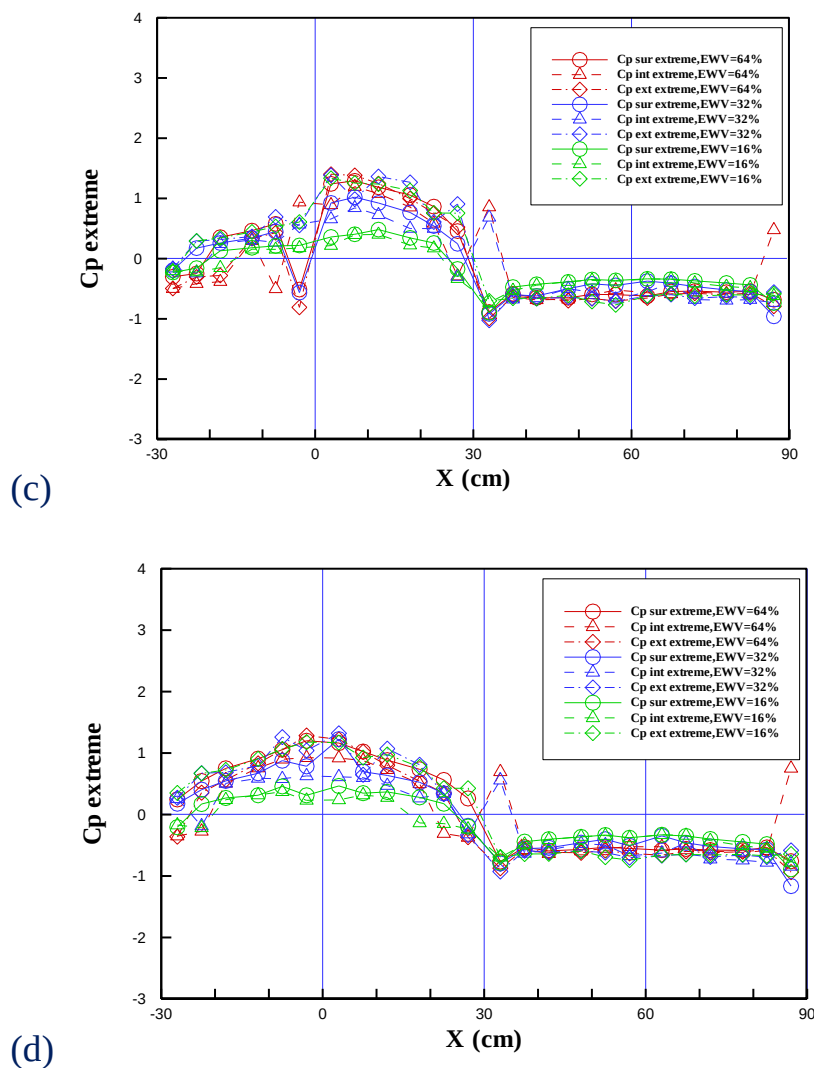


圖 4-13 模型 A，相鄰夾層空間連通，多孔性外牆外部(ext)、背面(sur)尖峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角(a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。

資料來源：本研究繪製

3. 多孔外牆之內風壓係數變化

多孔性外牆風載重由外風壓減內風壓構成，由前述可知多孔外牆的外風壓係數未因開孔率的變化而有所影響，顯示外部風壓作用主要是反應周邊環流及來流直接作用，與氣動力模型的整體幾何造型有密切關係，對於界定其設計風壓係數，應可略去有關開孔率的影響。夾層中的內壓則顯然受到開孔率、面向、相鄰夾層空間連通性等影響，因此界定其內壓的設計風壓係數時，需考慮此類因素的影響。多孔性外牆風荷載估算以建築物外牆被覆物局部風壓之外風壓減內風壓方

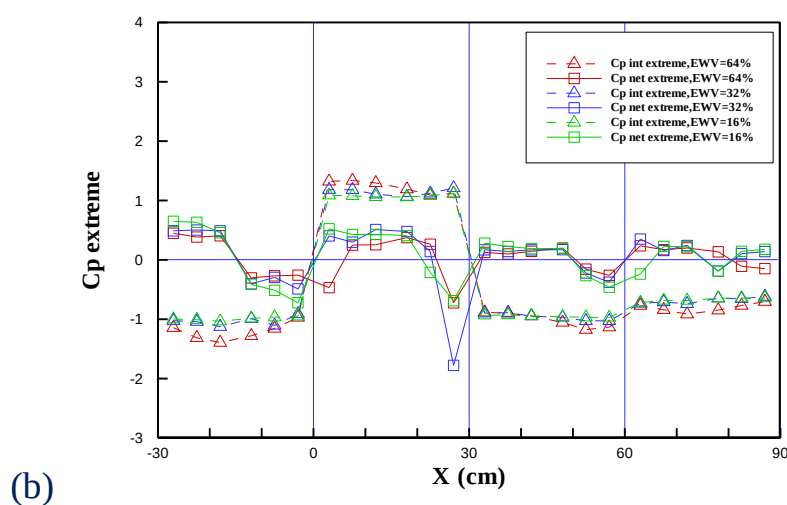
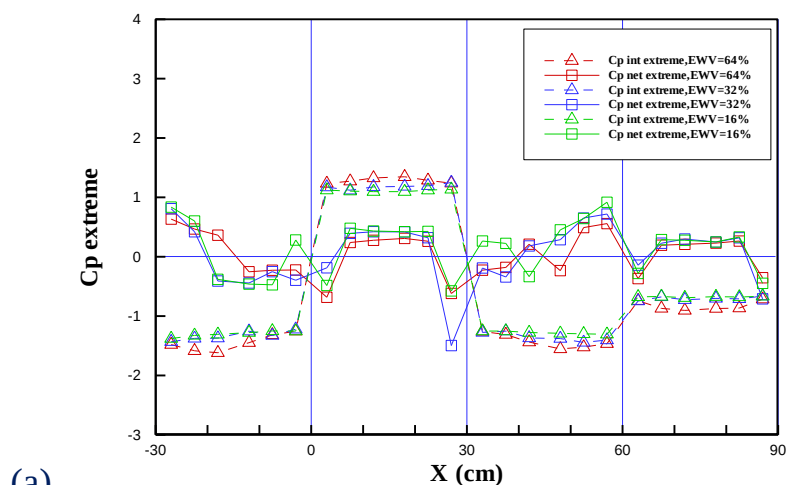
式計算或以開放式建築實體標示物的風力係數方式計算，以模型 A 的氣動力實驗結果加以探討，比較夾層空間之尖峰內風壓係數與多孔外牆之尖峰淨風壓係數分布情形，如圖 4-14~圖 4-15 所示。圖 4-14 為四面夾層空間封閉時，不同風攻角作用下，各面向的多孔性外牆尖峰淨風壓係數及夾層空間尖峰內風壓係數的變化情形，由於模型橫斷面為正方形，因此風攻角由 0 度變化到 45 度，其餘情形為對稱。由圖 4-14(a)顯示，風攻角 0 度時，迎風面的夾層內壓有最大的正風壓作用，同時最低的負風壓出現在側風面的面向。與圖 4-14(b)~(d)比較則顯示隨風攻角的改變，正風壓作用區域以上游面向為主，而產生的尖峰風壓係數變化範圍小於風攻角 0 度的狀況。

觀察圖 4-14 尖峰淨風壓係數的變化狀況，淨風壓計算由及時的外風壓減內風壓計算歷時資料，再推估其尖峰風壓係數，尖峰淨風壓係數的變化幅度較內風壓係數為小，因包括外風壓在不同區位的變化及內風壓變化，在單一面向範圍呈現較高的變異性，如迎風面上，內風壓分部屬於較均勻的正壓分布，而接近角隅區的正風壓會減少，因此相減之後，淨風壓係數出現負值。隨風攻角的改變，尖峰淨風壓係數變動的範圍有減少的趨勢，顯示在 0 度風攻角時有較大的尖峰風壓係數。由圖 4-13 顯示開孔率的影響，在內風壓係數方面，隨開孔率的下降，迎風面內風壓略為下降，而側風面與背風面有小幅回升，表示夾層空間的內風壓在正風壓的面向隨開孔率減少而下降，在負風壓面向則回升，其幅度約為 10%。開孔率的增加，引導更多的外部氣流進入夾層中，因此迎風面向最大開孔率開孔率的條件時內風壓係數最高，而側風面的內風壓係數亦是以最大開孔率條件時有最低的負風壓係數。最大開孔率的變化對淨風壓係數的影響則較缺乏明顯的趨勢，應與淨風壓同時含內外風壓係數的影響有關。

在各相鄰夾層均為連通情形下，如圖 4-15 所示，在風攻角 0 度時，夾層的尖峰內風壓係數變化幅度變大。隨開孔率由 64%遞減到 16%時，迎風面單一面向區間內風壓係數正負值均出現，靠近角隅區域，內風壓係數為負值，且其變化範圍略大於風避相鄰夾層連通的狀況。尖峰淨風壓係數的分布，亦是隨開孔率的下降而下降，正

值呈現減少，而負值則是降低更多。隨風攻角的變化，比較圖 4-15(a)~(d)的變化趨勢，顯示兩類尖峰風壓係數變化範圍均是逐漸收小的狀況，以 45 度時其正負值變化範圍最小。

由於相鄰夾層連通時，代表其夾層間的內風壓有來自不同面向的外壓，在此空間內形成混合的現象，但仍與該面向外壓為主導該面向內壓變化。因此開放連通後，迎風面上內壓亦有負壓狀況的出現，背風面部分以尾流作用為主，無直接的來流作用，明顯內外壓差不大，多孔性外牆所受淨風壓較小。比較圖 4-14 與圖 4-15 在各不同風攻角作用下的背風面尖峰淨風壓係數，僅在封閉夾層連通時，背風面多孔性外牆有接近等壓牆的表現。



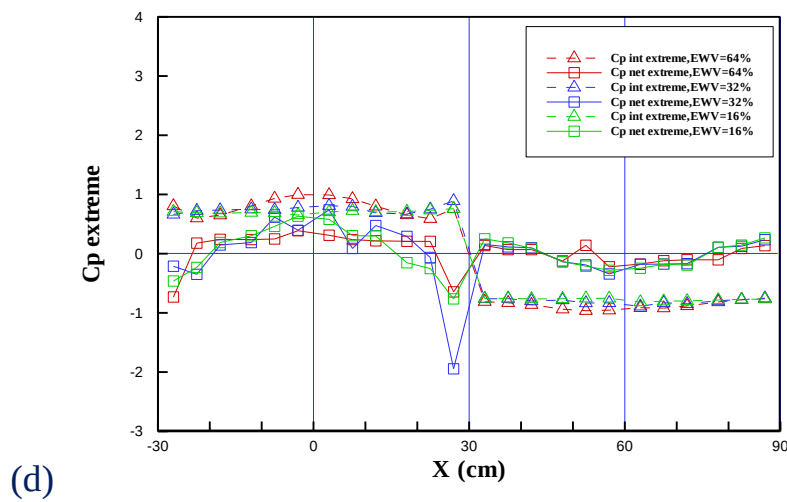
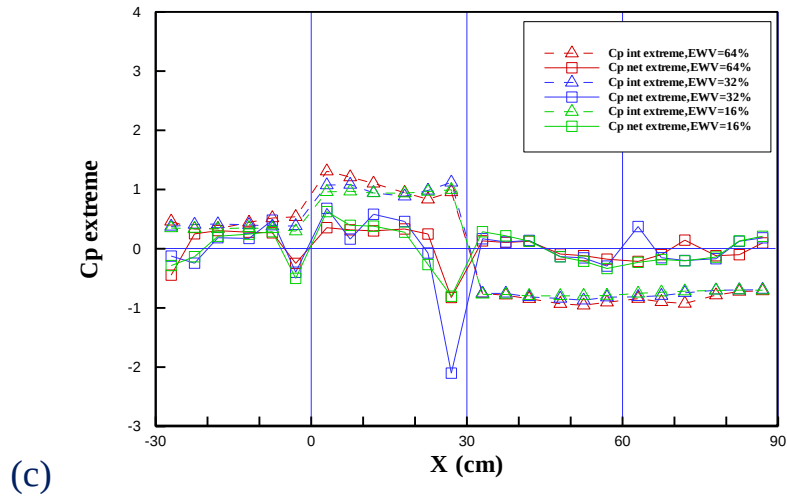
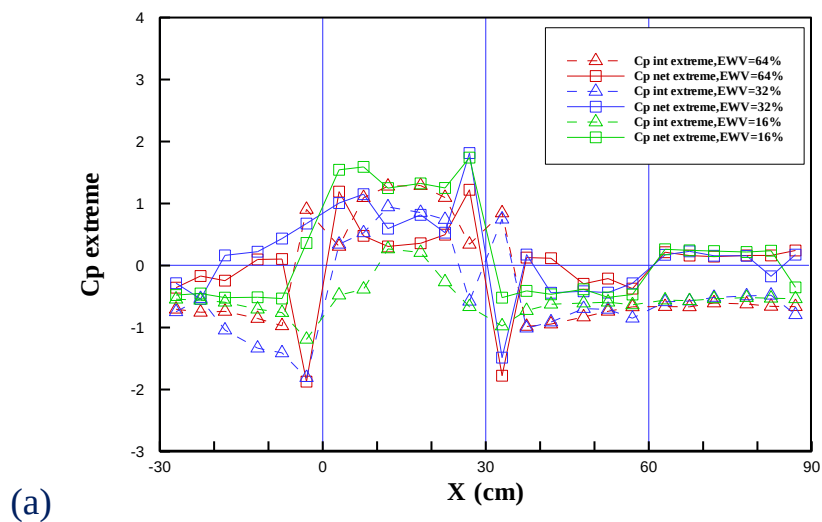


圖 4-14 模型 A，相鄰夾層空間封閉，多孔性外牆淨風壓(net)尖峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角 (a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。

資料來源：本研究繪製



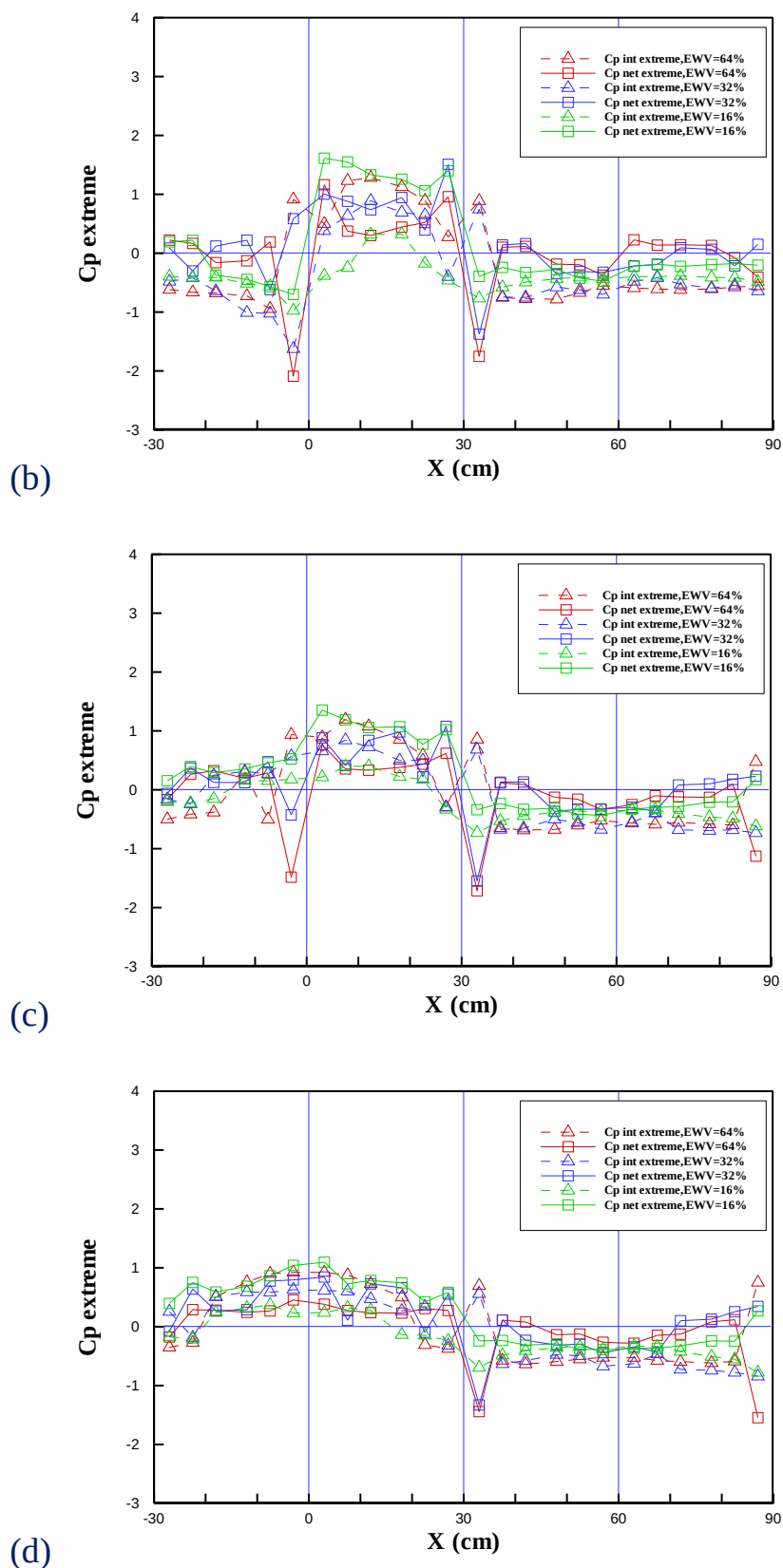


圖 4-15 模型 A，相鄰夾層空間連通，多孔性外牆淨風壓(net)尖峰風壓值及內部建物表面尖峰風壓值(int)於中央帶寬之分布情形，風攻角 (a)0 度，(b)15 度，(c)30 度，(d)45 度。

資料來源：本研究繪製

4.外牆開孔率對內部牆面風壓的影響

建築物加裝多孔性外牆對於內部建築物受風作用的影響，可由實驗量測所得外部風壓與內部建築物立面風壓兩者的差異進行了解，考慮對牆面而言正風壓為指向牆面(或窗面)的壓力，而負風壓則是為對牆面(或窗面)拉拔的力量，正負號代表的是方向性，其絕對值代表作用的強度，因此取用外部平均風壓係數的絕對值與內部建築物立面平均風壓係數的絕對值兩者相減，如式(5)所示。實際建築設計上對於正負風壓亦對建築構件有不同的意義，本部分的比較以強調其強度的差異，因此風壓係數以絕對值處理。外部平均風壓為未加裝多孔性外牆建築物外殼所受的風壓，內部建築物立面平均風壓係數表達加裝多孔隙外層牆之後，內部建築物所受到的風壓作用，因此此相減的結果，差值如為負值，代表多孔性外牆有減低內牆面所受風荷載強度的作用，如為正值則代表內牆面所受風荷載強度反而增加。

$$\Delta C_p = |C_{p\ int}| - |C_{p\ ext}| \quad (5)$$

風攻角零度時，多孔性外牆內外尖峰風壓係數的差值如圖 9 所示，載相鄰夾層不相連通的情形下，如圖 16(a)， ΔC_p 主要分布均接近零值，但在角隅部分則有正值出現，代表角隅部分內部建築物所受風荷載略有上升，其幅度約為 0.2。開放夾層相互連通時，如圖 16(b)， ΔC_p 主要分布為負值，代表多孔性外牆有減輕內部建築物立面風壓強度，且其效果以迎風面最大，隨開孔率的增加，其效果逐漸減少。但開放夾層相互連通時，在角隅部分 ΔC_p 則有正值出現，且其幅度略大於不相連通的情形。整體而言，加裝多孔性外牆以夾層相互聯通時，對於減輕內部建築物立面風壓作用具有其價值。

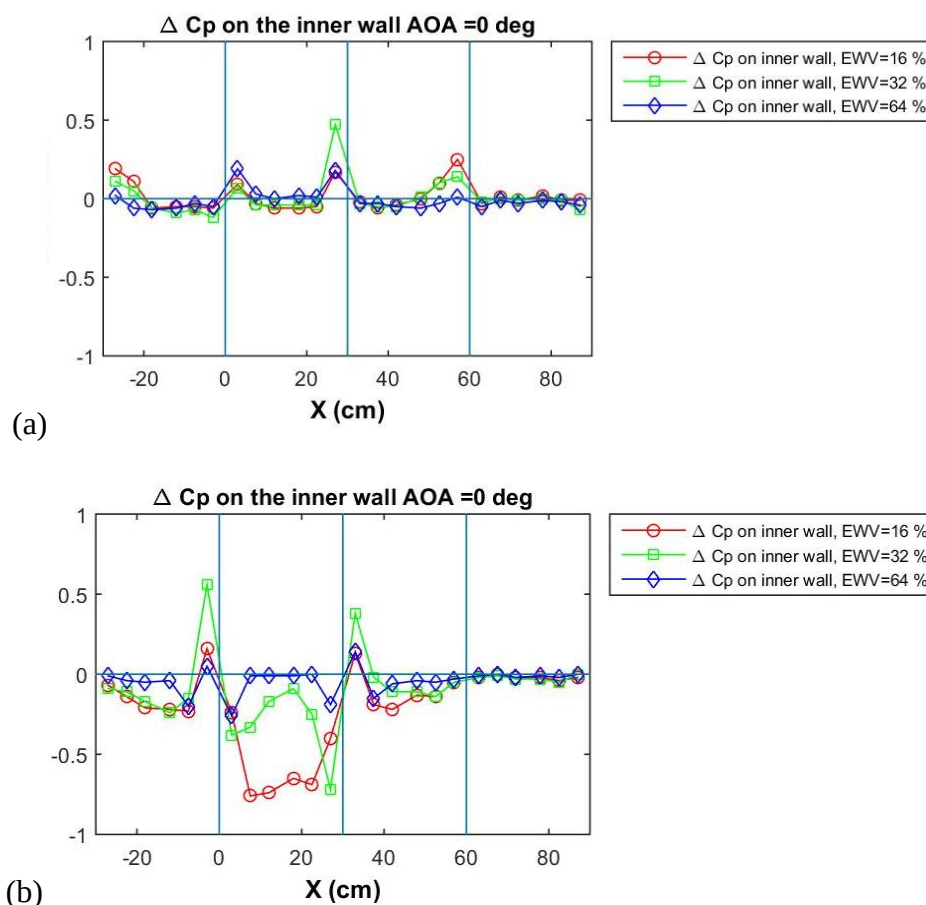


圖 4-16 風攻角 0 度時，中央高度，四面向多孔外牆對於內牆面風壓減抑情形，(a)四面夾層不連通，(b)四面夾層相連通。

資料來源：本研究繪製

5. 外牆開孔率對外牆面風壓頻譜特性的影響

多孔性外牆所受擾動性風壓作用亦可利用頻譜之表現加以檢核，本研究採用模型 A 之多孔性外牆實驗數據，側風面有較強的分離剪力流渦流擾動，因此取用模型高度二分之一位置，側風面中央區域之外風壓歷時資料，經由移除平均值、正規化後計算其無因次化頻譜，在不同開孔率條件下，相鄰夾層不相連通時，頻譜如圖 4-17 所示。如開放夾層連通性，相同區位條件所得之風壓頻譜如圖 4-18 所示，其中將所有外牆開孔封閉形成的零開孔率，則無夾層連通性的區分。比較圖 4-17 及圖 4-18 顯示，側風面窄頻的現象較為明顯，主有明顯的主頻分布，不同開孔率對於頻譜分布狀況，並無明顯改變，印證風壓係數的表現，外牆所受外風壓的擾動性風壓在不同開孔率，仍具有其一致性，且其主要能量集中的主頻位置亦相同。因

此，由外部風壓的尖峰值及頻譜分布情形可知，外風壓係數主要是受到建築物量體形成的周邊流場擾動影響，而與開孔率的關聯輕微。

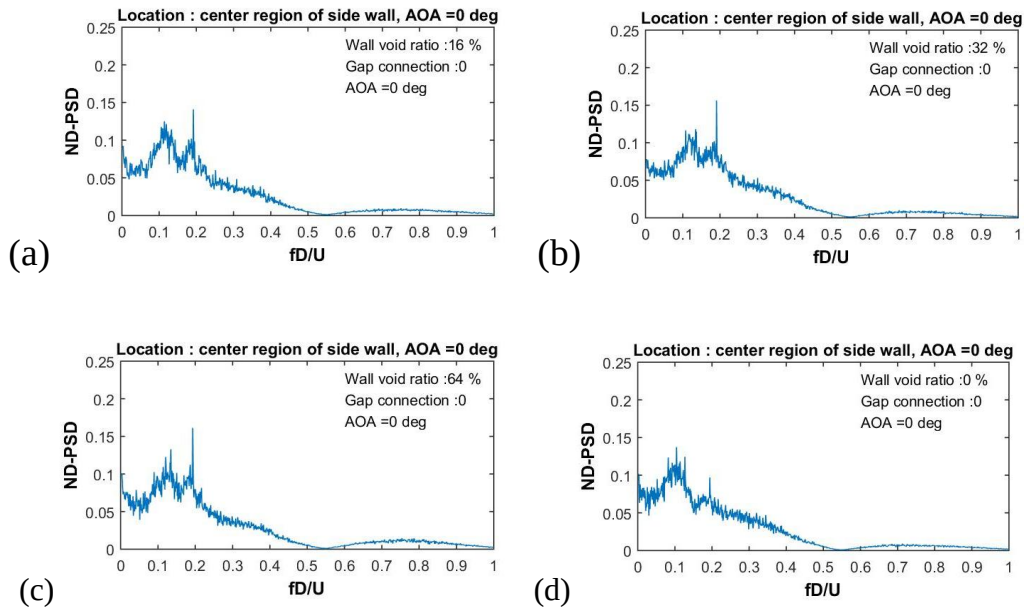


圖 4-17 模型 A，風攻角 0 度時，相鄰夾層不連通，模型側風面二分之一高度，中央區域之風壓頻譜，開孔率 (a)16%，(b)32%，(c)64%，(d)0%。

資料來源：本研究繪製

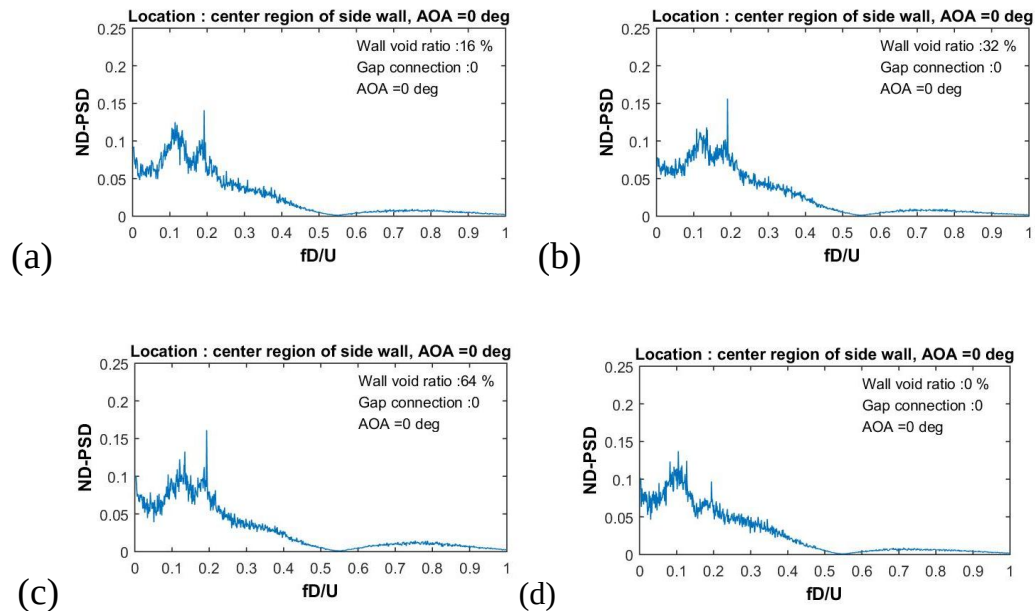


圖 4-18 模型 A，風攻角 0 度時，相鄰夾層不連通，模型側風面二分之一高度，中央區域之風壓頻譜，開孔率 (a)16%，(b)32%，(c)64%，(d)0%。

資料來源：本研究繪製

第二節 第一階段氣動力實驗成果小結

第一階段氣動力實驗主要目的為釐清重要的具有多孔性外牆建築物模型的氣動力特徵，配合後續建議設計風壓係數的需求，探討對象以由實驗資料進一步推估所得的尖峰風壓係數變化為主，包括以下幾個項目：

1. 多孔外牆夾層空間內的壓力變化：由第一階段實驗成果顯示，多孔外牆背面的尖峰風壓係數與內部建築物立面上的尖峰風壓係數在不同開孔率、不同間距、相鄰夾層連通性等不同條件下檢核均呈現相互一致，實驗數據兩者風壓係數差異在 0.1 以內，此現象可推論夾層空間內部無明顯的壓力梯度變化，因此此兩項尖峰風壓係數均具有相同角色。
2. 多孔外牆外部的尖峰風壓係數受多孔外牆影響：由第一階段實驗成果顯示，多孔外牆外部的尖峰風壓係數在不同開孔率、不同間距、相鄰夾層連通性等不同條件下均呈現相同的分布狀況。顯示外部風壓作用主要由建築物周邊流場與來流影響，對於多孔性外牆其上開孔狀況，未能達到改變建物周邊渦流形成與分布的程度，因此外部風壓特徵並未改變，此一特性有助於在建立多孔性外牆設計風壓係數時減少外風壓係數的考慮變因。
3. 多孔性外牆尖峰風壓係數受風攻角的影響：由實驗結果顯示，風攻角的改變對於多孔性外牆內外各部的尖峰風壓係數分布有所影響，主要亦是因風攻角的變化，對於建物周邊渦流結構有明顯的影響，基於安全考慮，建議之設計風壓係數應以能涵蓋各不同條件下風壓係數值的範圍，本階段實驗成果的討論顯示，以風攻角 0 度時，各面向的尖峰風壓係數變化範圍較廣，因此應可主要以 0 度風攻角的情形下進行設計風壓係數的推估。
4. 多孔性外牆淨風壓係數與夾層內風壓係數特性：依本階段實驗成果分析，尖峰風壓係數的變化幅度以夾層內風壓係數略小於淨

風壓係數的表現，考慮淨風壓係數同時反映外風壓與內風壓的共同作用，因此受建築物外型變化的影響甚大，如作為設計風力係數使用，必須將建築物外型做更細的分類且可能使結果趨於複雜化。如將內風壓變化特性進行探討，外風壓的考慮可整合到目前規範關於建築物外部被覆物局部設計風壓係數的範疇，配合本計畫對於內風壓的設計風壓係數建議，應可提供較為簡明的計算流程。

第三節 第二階段氣動力實驗

第二階段氣動力實驗，控制參數包括風攻角、夾層間隔、開孔率、夾層連通性等，可更完整的探討夾層內風壓的變化。本研究取用模型一半高度位置帶寬的風壓係數分布狀況，探討其平均值、尖峰值等變化情形。由第一階段氣動力實驗可見夾層空間連通性對於風壓係數的變化有很大的影響性，主要分為相鄰夾層空間不相連通及相連通兩大類型，第二階段進行此兩大類型的氣動力實驗，包括多孔性外牆開孔率、夾層間距、風攻角等條件均設置一致的變化條件，以比較兩者風壓係數差異，並可提供多孔性外牆設計風壓係數的推估之用，流場條件採用均勻紊流場，其紊流強度接近地況 C 的低層流況，並透過實驗平台避開近地表邊界層的影響，實驗結果討論如下。

一、四面夾層不連通時

1. 平均風壓係數

風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆內外風壓平均風壓係數於中央帶寬在不同夾層間隔時的分布情形如圖 4-19 所示，圖中包括夾層間隔距離由 1cm 變化至 4cm，不同開孔率及夾層間隔對於各面平均風壓的影響不大，不同面向平均風壓係數各自趨近於定值，無明顯的中央區域與角隅區域的分別，因此在相鄰夾層空間不相連同情形下，各面向多孔性外牆所受平均風壓的內外壓均相同，實驗範圍用到的開孔率 15%到 60%均有相同的結果。比較多

孔性外牆外風壓及淨風壓兩者平均風壓係數於中央高度帶寬在不同夾層間隔時的分布情形如圖 4-20 所示，由圖 4-19 已了解到內外風壓平均值均一致，因此圖 4-20 中淨風壓係數在夾層間隔距離由 1cm 變化至 4cm 及不同開孔率條件下，均為零值，平均值呈現接近內外等壓的狀態。

由第一階段氣動力實驗了解夾層空間壓力梯度的變化甚為微小，本階段實驗中，在風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，取多孔性外牆背面風壓平均風壓係數與內部建物立面風壓平均風壓係數兩相比較，如圖 4-21 所示，圖中包括夾層間隔距離由 1cm 變化至 4cm，多孔性外牆背面風壓平均風壓係數與內部建物立面風壓均風壓係數兩者均一致，顯示此空間內風壓分布在夾層間隔距離深度方向無壓力梯度的存在，內部建築物立面上的平均風壓分布狀況與外牆背面風壓平均風壓相同。

2.尖峰風壓係數

在風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，尖峰風壓係數的變化方面，多孔性外牆內外風壓尖峰風壓係數於中央高度帶寬在不同夾層間隔時的分布情形如圖 4-22 所示，不同開孔率及夾層間隔對於各面尖峰風壓的影響亦是不明顯，不同面向外風壓尖峰值各自趨近於定值，無明顯的中央區域與角隅區域的分別，淨風壓尖峰值的分布則在迎風面上隨夾層間隔的增加，略有中央區域與角隅區域的分別。多孔性外牆淨風壓尖峰風壓係數變化如圖 4-23 所示，在相鄰隔間不相連通情形下，雖其淨風壓的平均值接近零，但淨風壓的尖峰風壓係數則有隨分布區域而略微不同，如圖 4-23，外風壓與淨風壓兩者尖峰風壓係數相比，明顯的外風壓尖峰風壓係數均較為高，顯示多孔外牆所受淨風壓尖峰值仍略低於外風壓尖峰值。在相鄰夾層空間不連通時，取多孔性外牆外部尖峰風壓係數與內部建物立面風壓尖峰風壓係數兩相比較，如圖 4-24 所示，圖中包括夾層間隔距離由 1cm 變化至 4cm，多孔性外牆之外部尖峰風壓係數與內部建物立面風壓尖峰風壓係數兩者差異不大，內部建物立面風壓尖峰風壓係數略小於外牆之外部尖峰風壓係數約 0.1~0.2，對內部建築物所受尖

峰風壓作用減輕作用甚微。

同時，觀察多孔外牆的外風壓部分，迎風面的正風壓值達到最高，而側風面的負值則最低，且兩者的絕對值接近，因此對於外風壓的考慮，應同時有正負兩種情形均須考慮。

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

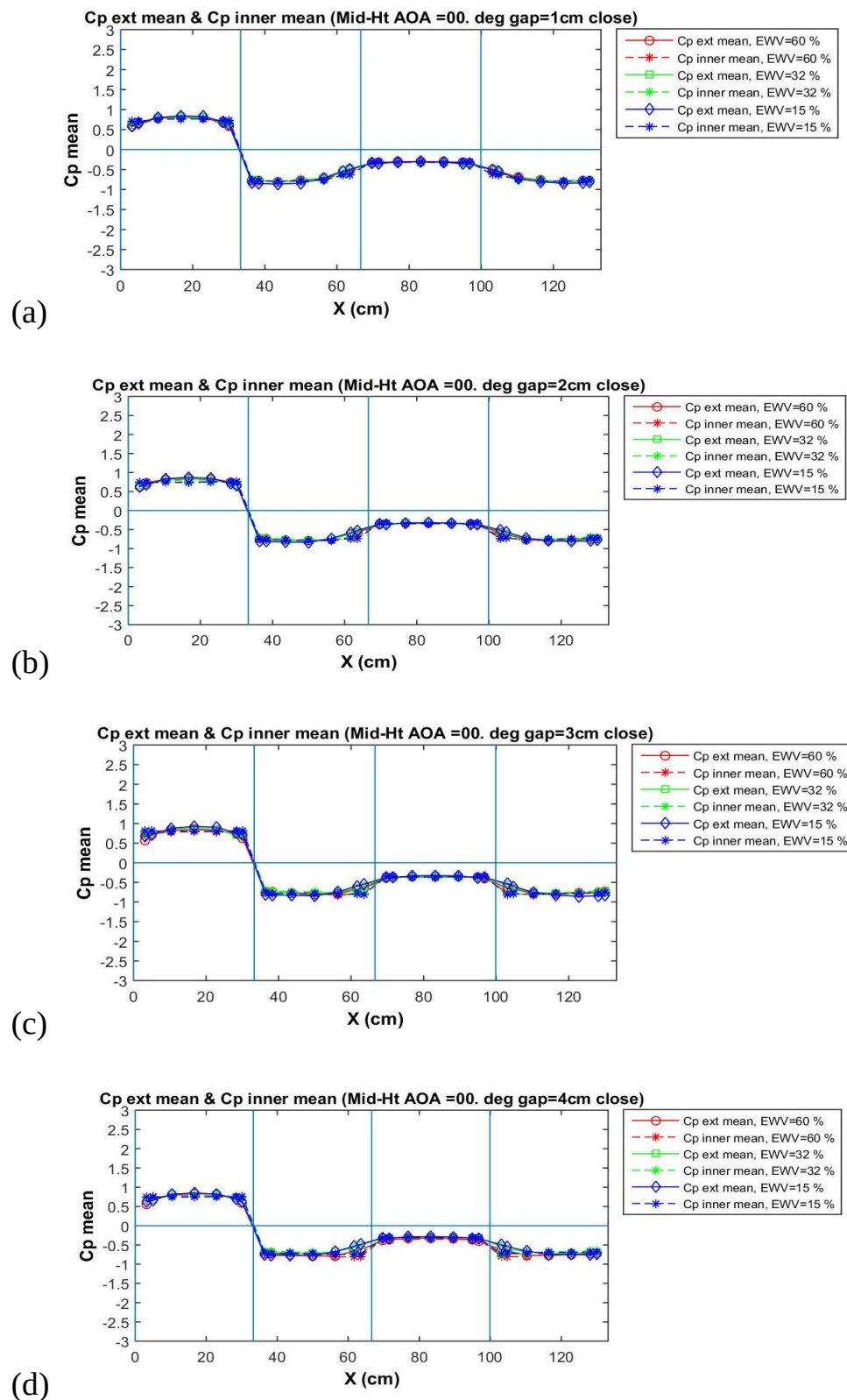


圖 4-19 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆內外平均風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

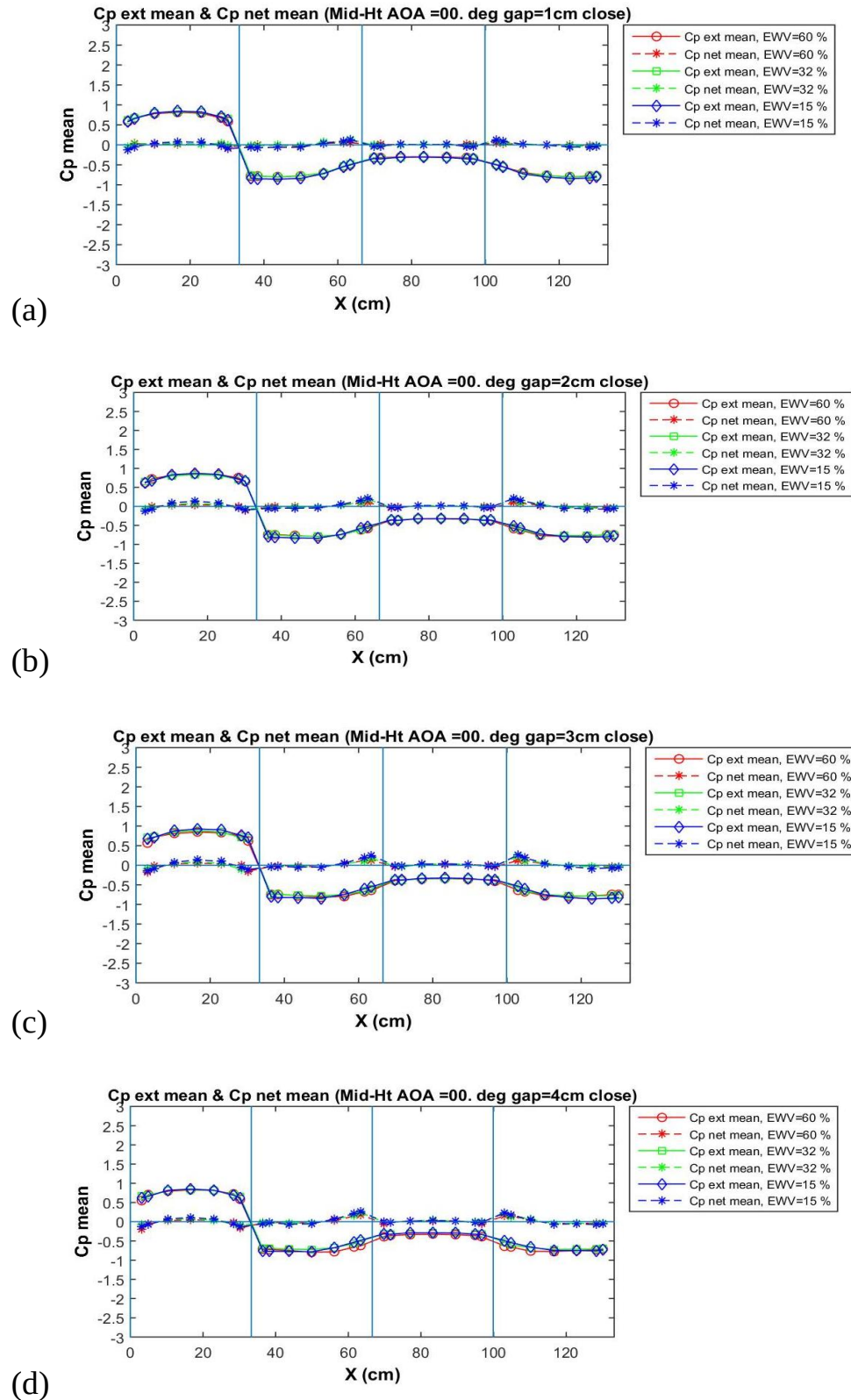


圖 4-20 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外風壓平均風壓係數及淨風壓平均風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

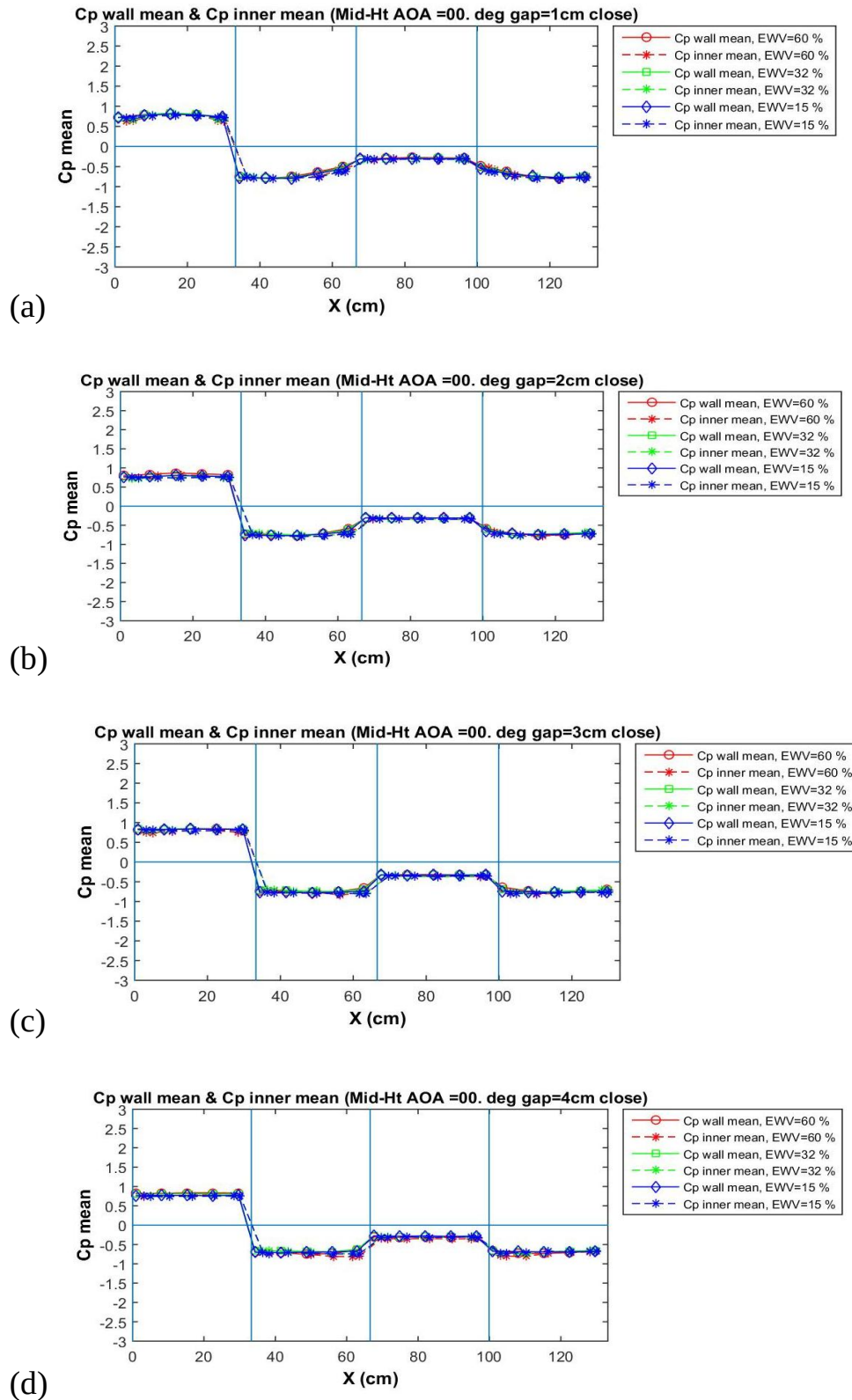


圖 4-21 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆背面風壓平均風壓係數及內部建物立面風壓平均風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

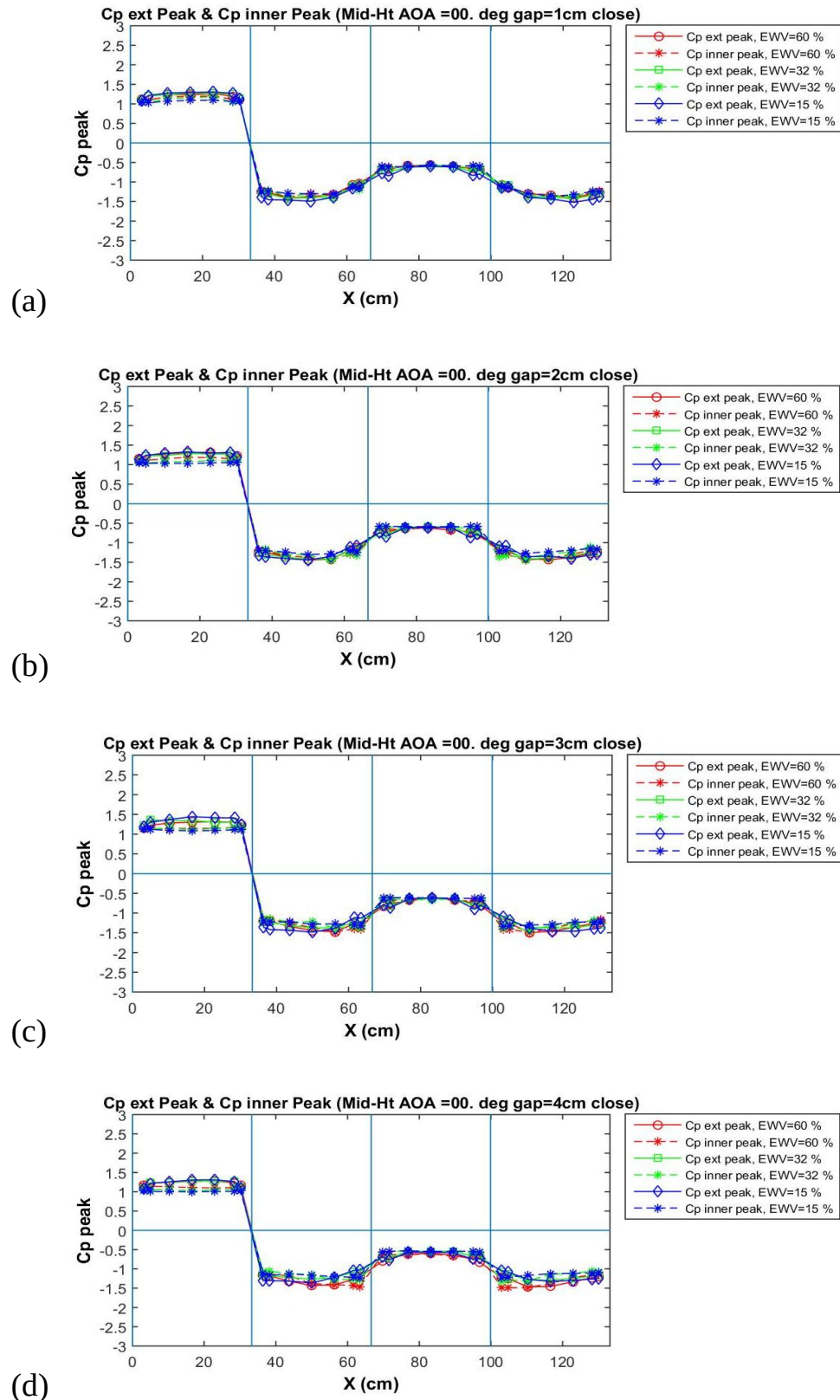


圖 4-22 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆內外尖峰風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

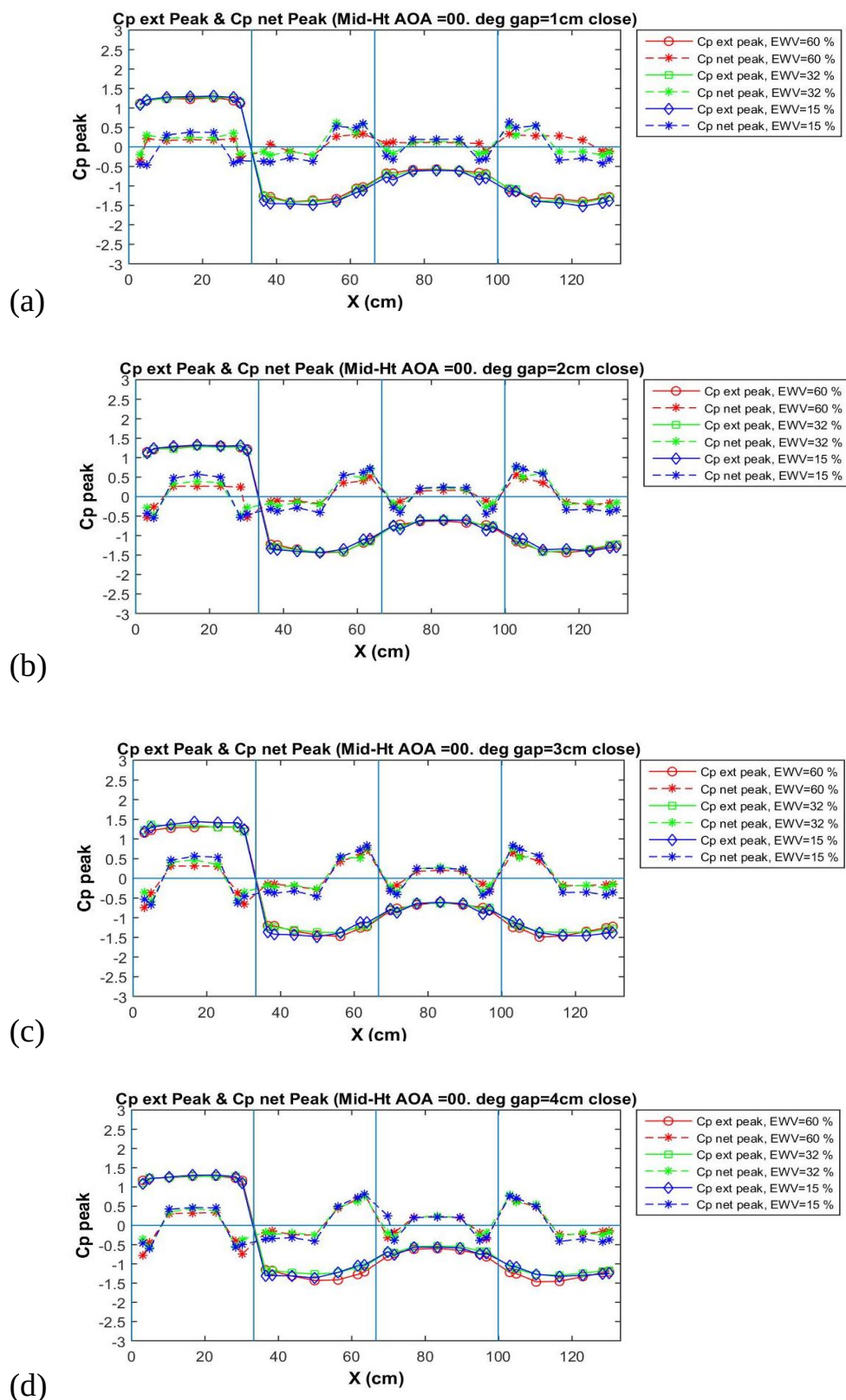


圖 4-23 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外部尖峰風壓係數及淨風壓尖峰風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

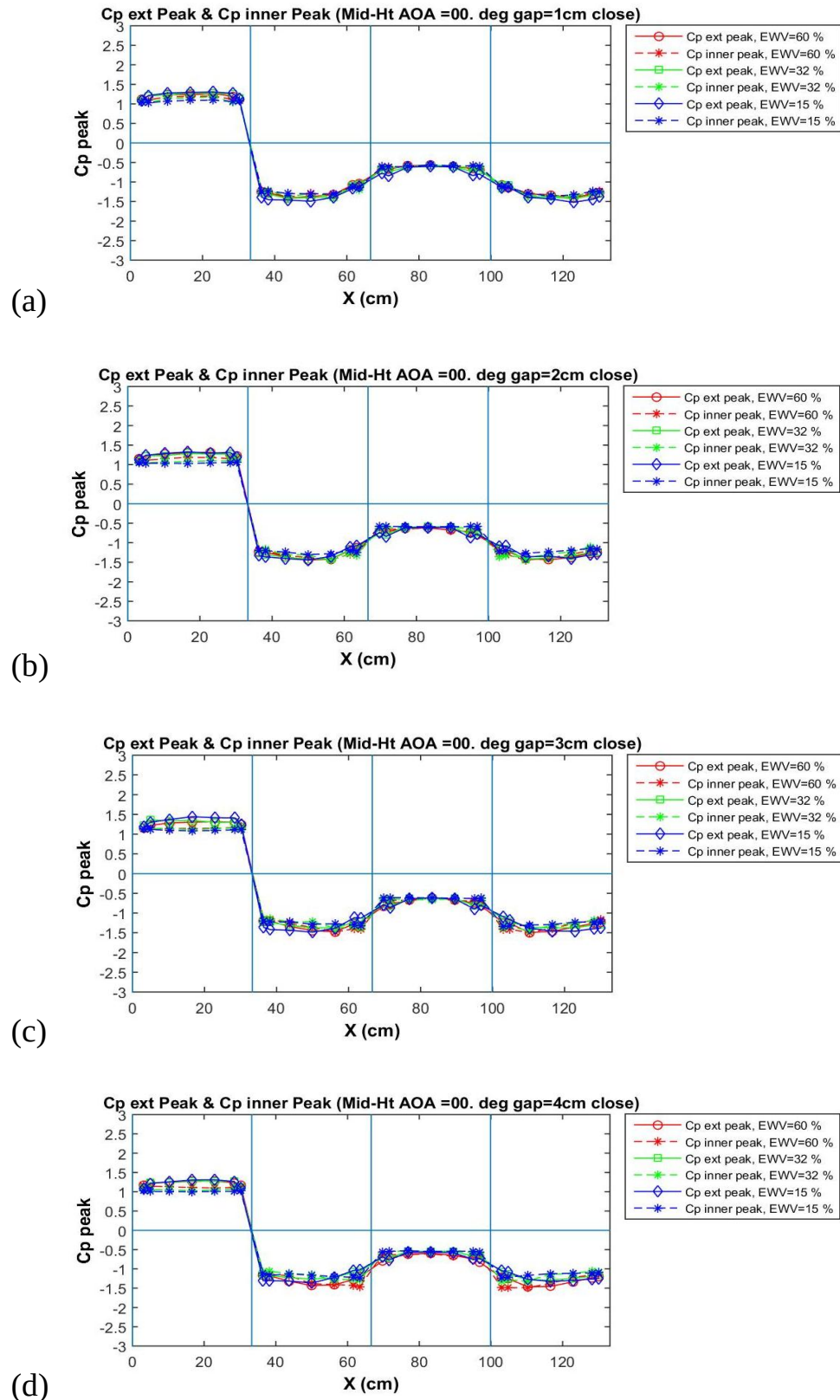


圖 4-24 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外部尖峰風壓係數及內部建物立面風壓尖峰風壓係數於中央高度帶寬之分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

二、四面夾層相互連通時

1. 平均風壓係數

將模型四面夾層間的隔板抽出後，四面夾層相互連通的情形，風攻角 0 度，首先取多孔性外牆內外風壓平均值及內部建物表面風壓平均值於中央帶寬在不同夾層間隔時的分布情形作比較，如圖 4-25 所示，多孔性外牆中間高度的背面平均風壓係數($C_{p\ int}$)隨間距增加而下降，迎風面上，多孔性外牆背面風壓分布，中央區域與邊緣區域呈現不同的分布情形。

比較多孔性外牆在本條件下的外部風壓平均風壓係數與淨風壓的平均風壓係數，如圖 4-26 所示，外部風壓平均風壓係數在各不同夾層間距時，呈現一致性的分布，但淨風壓受到夾層內部風壓隨夾層間距增加而下降的影響，淨風壓平均風壓係數隨夾層間距增加而上昇，且受到夾層內部風壓影響而有中央區域與邊緣區域呈現不同的分布情形。

為了解多孔性外牆對內部建築物立面風壓的影響，取用多孔性外牆在本條件下的外部風壓平均風壓係數與內部建築物立面風壓的平均風壓係數相比較，如圖 4-27 所示，外部風壓平均風壓係數在各不同夾層間距時，呈現一致性的分布，但內部建築物立面風壓隨夾層間距增加，各不同開孔率外牆對內部建築物立面的風壓平均風壓係數隨開孔率減少而下降，各不同開孔率的影響性隨夾層間距增加而漸趨明顯。此變化趨勢與多孔外牆背面風壓的變化趨勢相同(圖 4-25)，同時均以迎風面的變化較為顯著，其他面向則多孔外牆背面風壓與內部建築物立面的風壓平均風壓係數均接近定值，顯示來流透過高開孔率而直接影響迎風面的夾層內壓，迎風面上開孔率越高則直接來流進入夾層內越多；其他面向屬負壓作用，亦透過開孔進入夾層，並在相連通的夾層內有氣相混合的作用，夾層間距的增加，應更有助於此現象的成長，因此影響到迎風面的夾層內部壓力有下降的趨勢。

2. 尖峰風壓係數

取多孔性外牆內外之尖峰風壓係數於中央高度帶寬在不同夾層間隔時的分布情形作比較，如圖 4-28 所示，多孔外牆中央高度的背面風尖峰風壓係數($C_{p\ int}$)夾層間距的增加而下降，且其變化幅度較平均風壓係數更大，且相同的在迎風面上，多孔性外牆背面風壓分布，中央區域與邊緣區域呈現不同的分布情形。

取多孔性外牆外風壓尖峰風壓係數及多孔性外牆淨風壓尖峰風壓係數於中央高度帶寬在不同夾層間隔時的分布情形作比較，如圖 4-29 所示，顯示淨風壓係數之尖峰值分布情形，類似於背面風尖峰風壓係數($C_{p\ int}$)隨夾層間距而變化的相同趨勢，顯示外風壓係數主要由來流流場條件所影響，多孔性外牆背面風壓則受多孔性外牆設置條件(開孔率、夾層間隔)而變化，因此有相同的變化趨勢。圖 4-29 亦顯示在迎風面及側風面上，淨風壓尖峰風壓係數的分布有中央區及角隅區的差別，以角隅區尖峰值較高，與多孔性外牆背面風壓分布有相同特徵。

比較多孔性外牆外風壓尖峰風壓係數及內部建物立面尖峰風壓係數於中央高度帶寬在不同夾層間隔時的分布情形，如圖 4-30 所示，外部尖峰風壓分布狀況不隨開孔率、夾層間隔距離而變化，內部建物立面尖峰風壓係數在迎風面面向隨開孔率的提高而增加，且夾層間隔距離越大則越明顯。內部建物立面尖峰風壓係數在所有面向上其絕對值均小於外部尖峰風壓的絕對值，因此具備多孔性外牆及夾層間隔的方形斷面建物，在四面夾層空間相互連通時，以受風作用的強度而言，多孔性外牆對內部建築物具有減輕風荷載的作用，以本研究顯示，開孔率達到 60%時，即不具減輕風荷載作用的效用，在此開孔率的外牆，僅對內部建築物角隅區域的風荷載有作用。

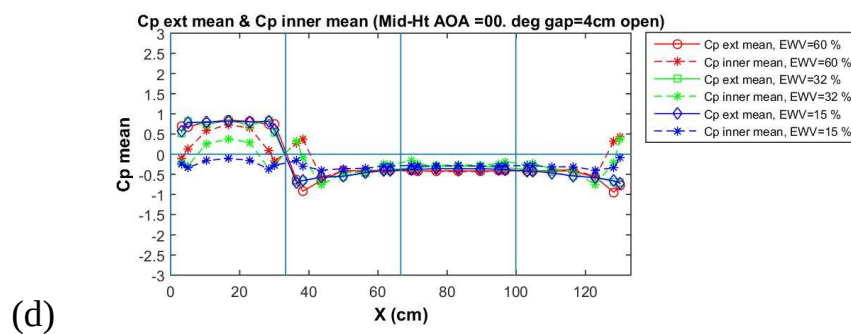
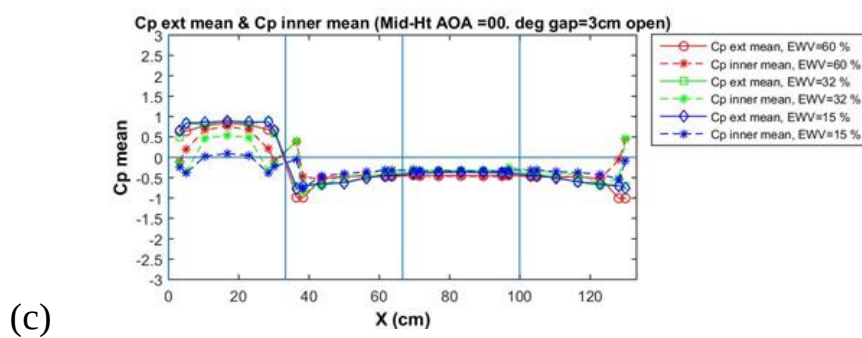
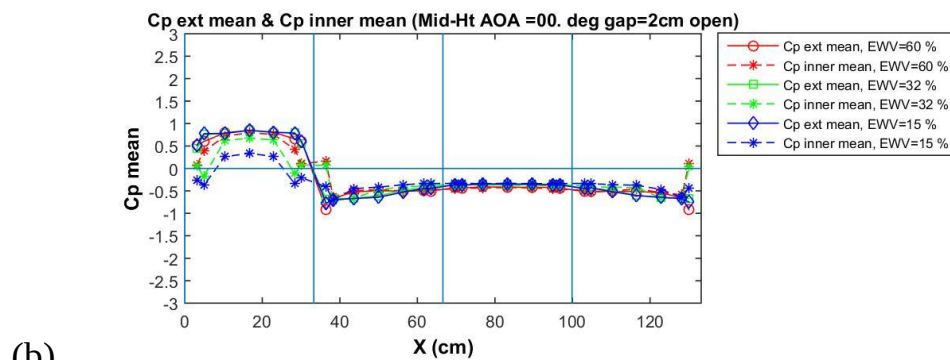
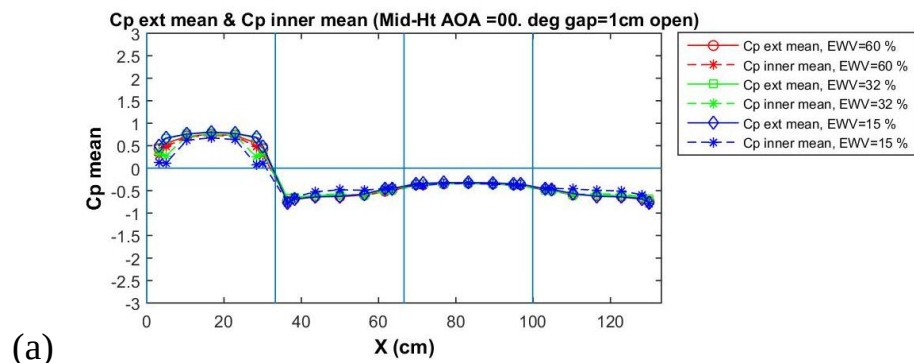


圖 4-25 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆內外之平均風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

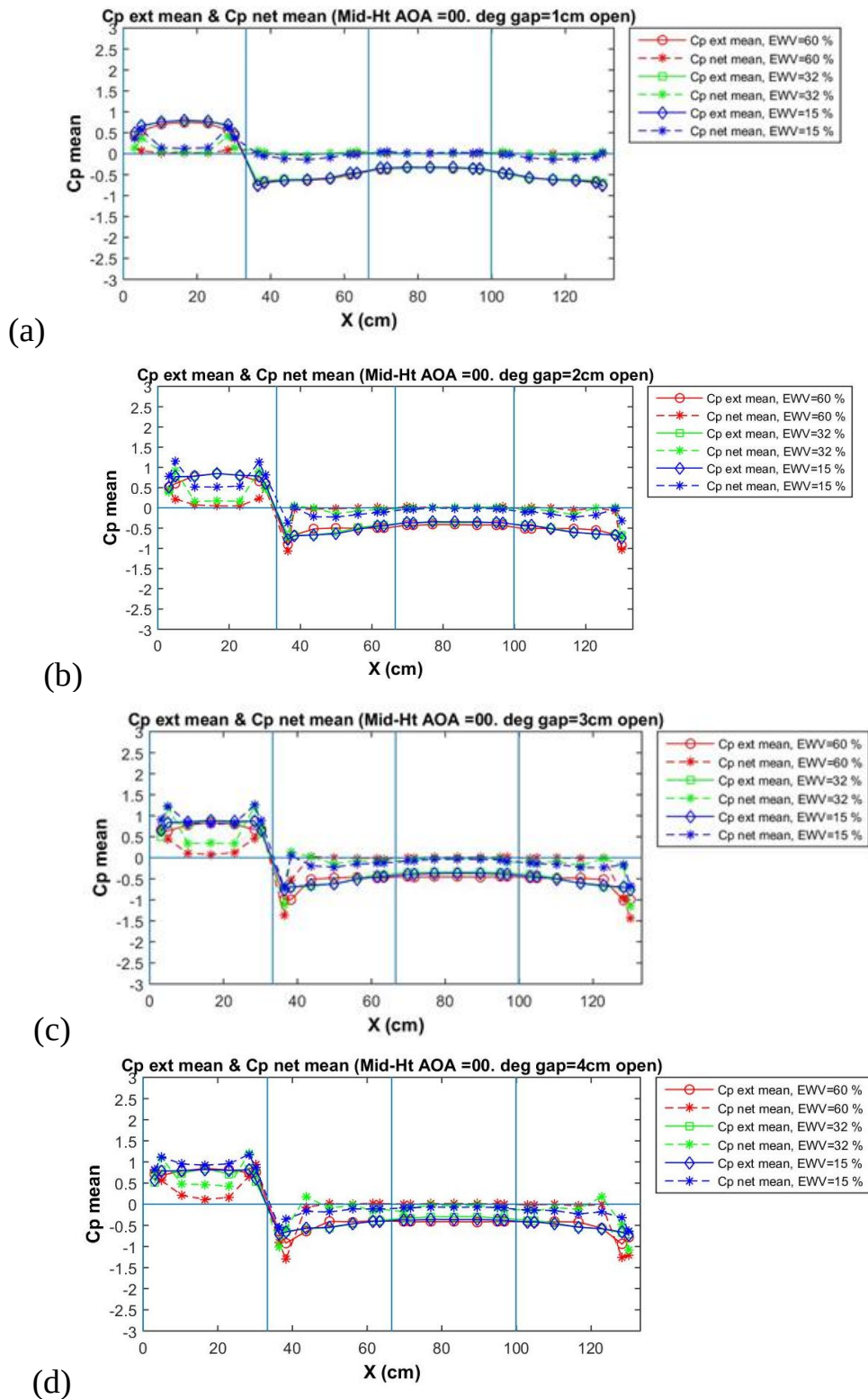


圖 4-26 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與淨風壓之平均風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔 (a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

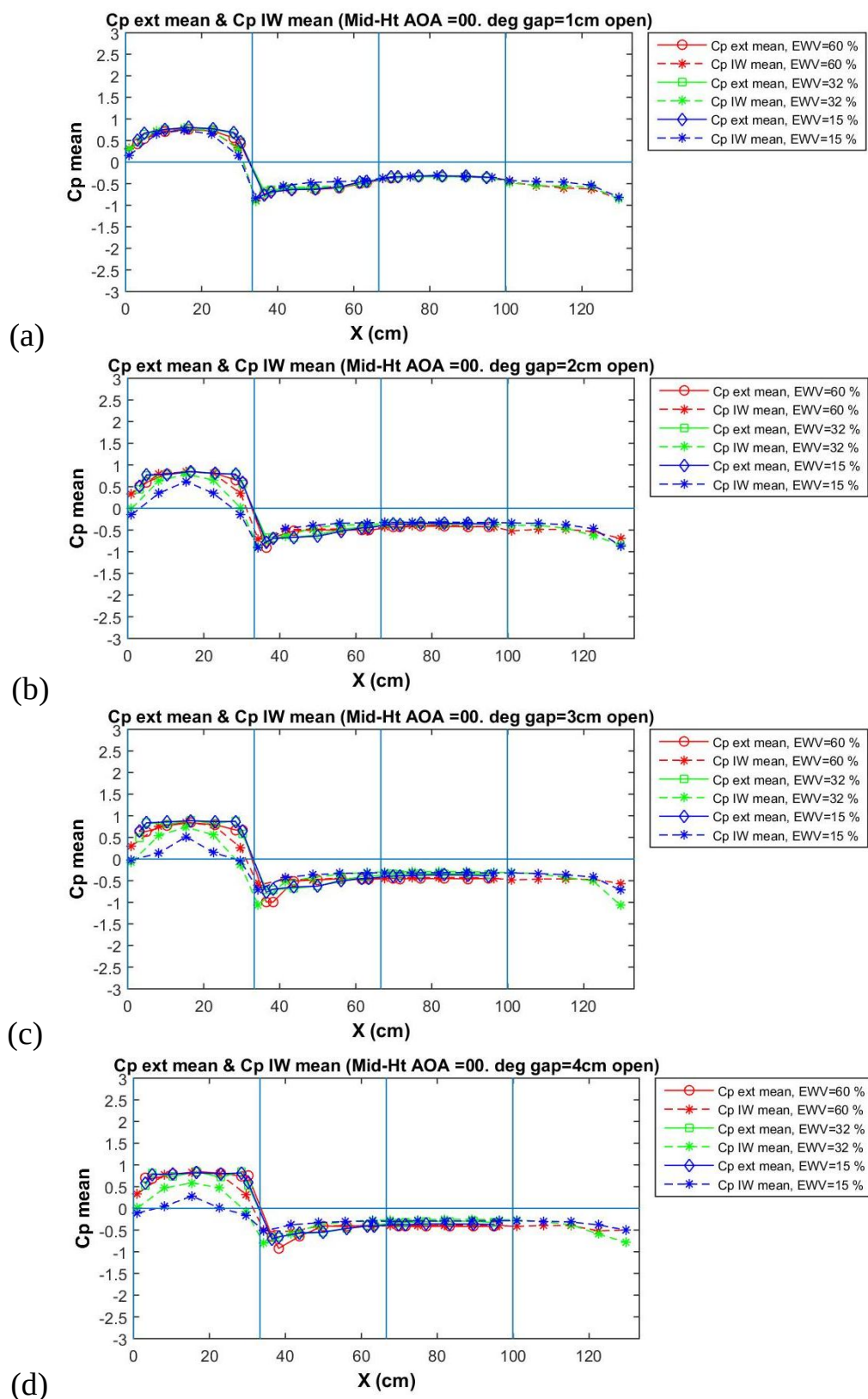


圖 4-27 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓平均風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

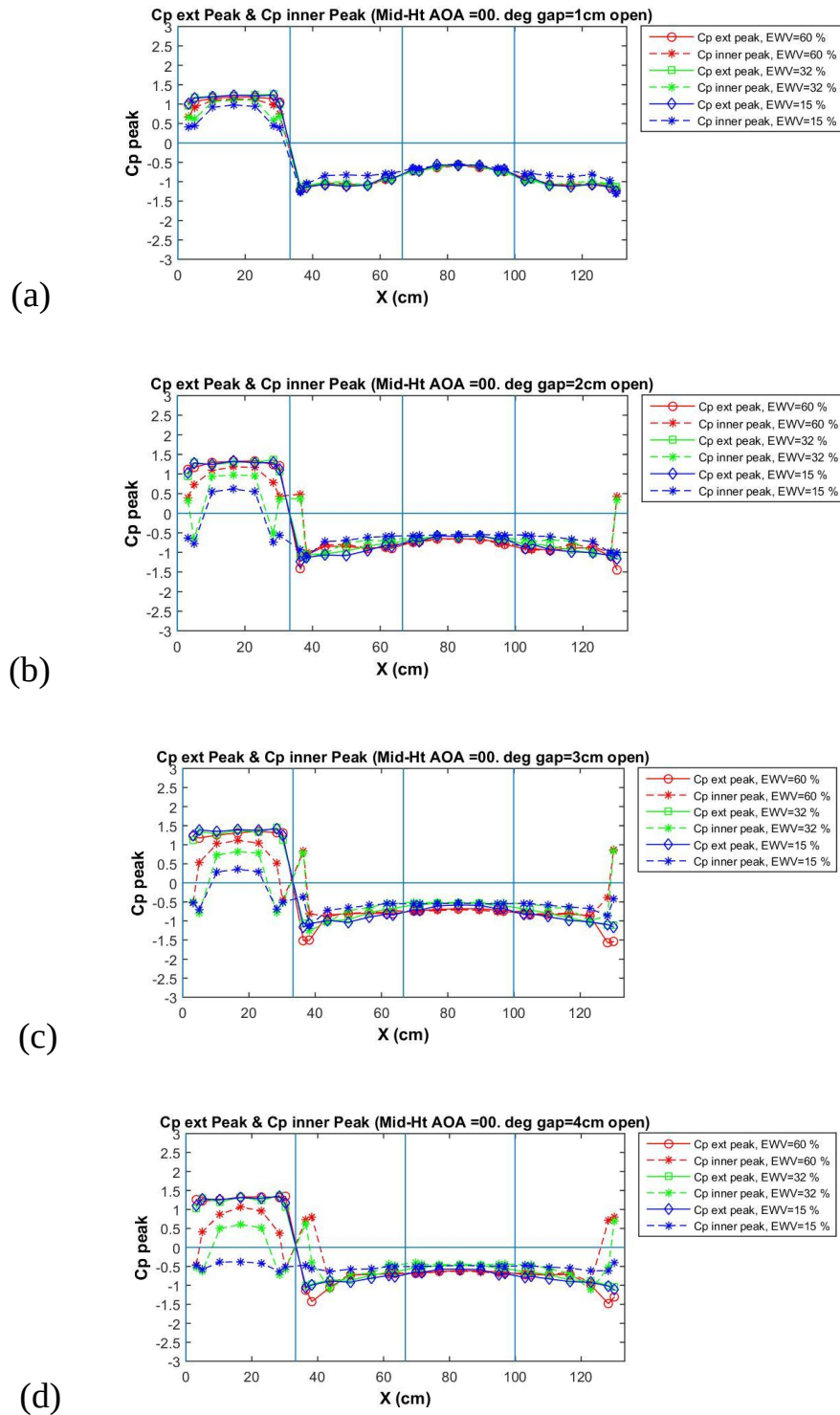


圖 4-28 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆內外之尖峰風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

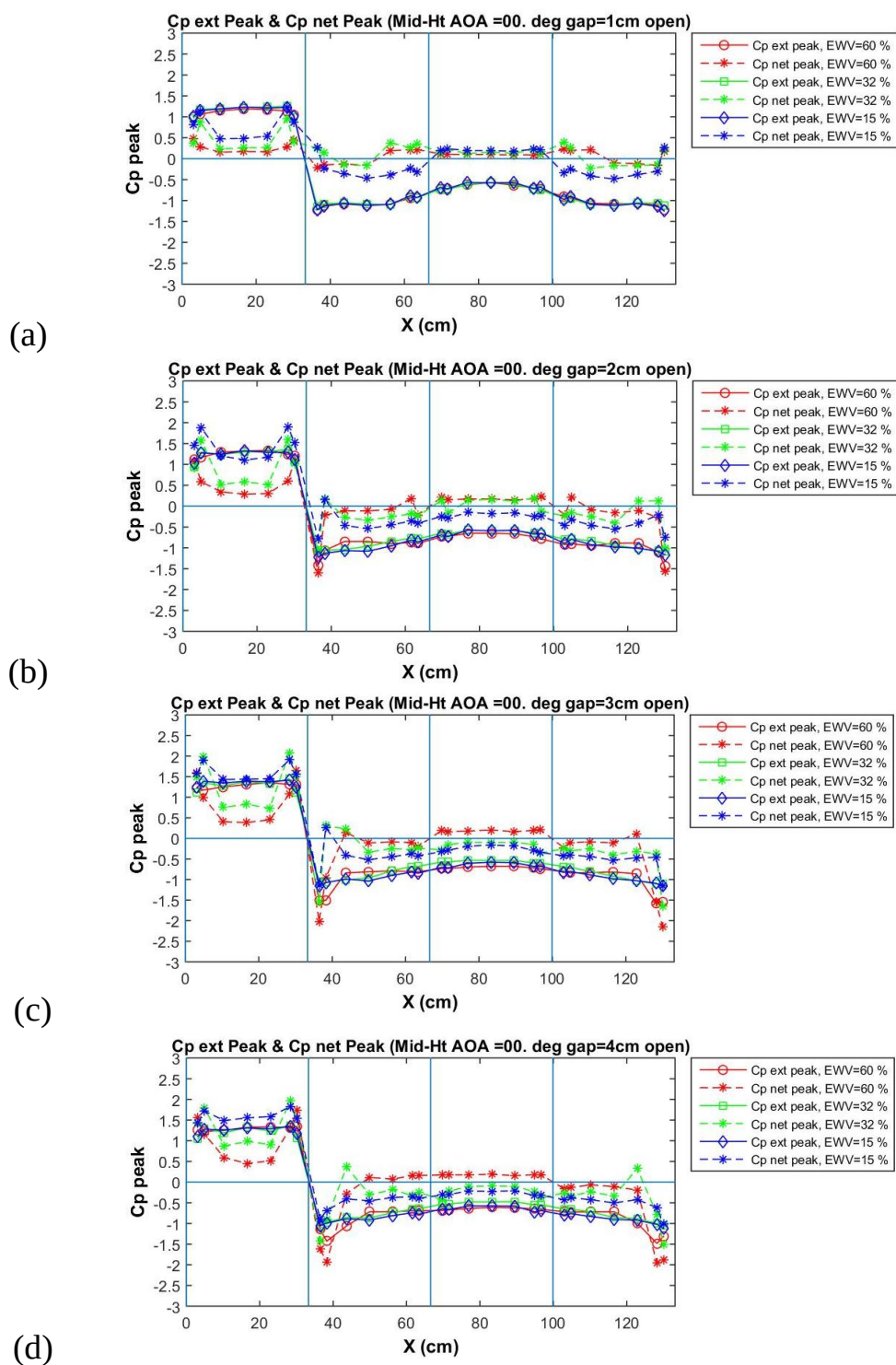


圖 4-29 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與淨風壓之尖峰值於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

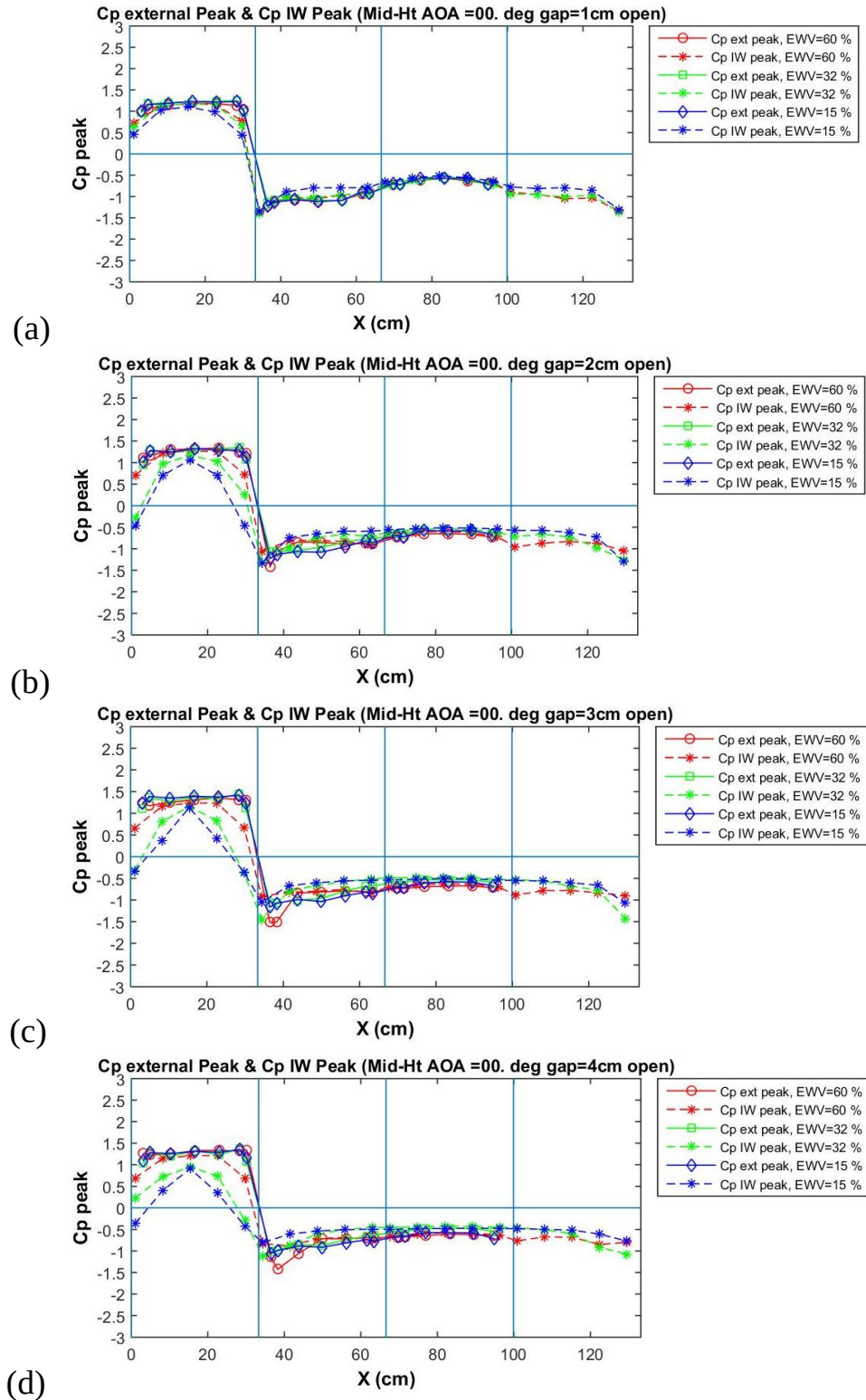


圖 4-30 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓之尖峰風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

三、多孔性外牆對內部建築物立面風壓擾動之影響

由前節有關多孔性外牆對內部建築物立面尖峰風壓係數的影響性(如圖 4-30)所示，多孔性外牆具備減輕內部建築物立面所受風荷載的作用，在擾動性風壓方面亦有相同的效果。如圖 4-31 所示，在相鄰夾層不連通的情形下，隨夾層間隔的增加，內部建築物立面上擾動性風壓係數較外牆之外部擾動性風壓係數均為低，迎風面及側風面上較具效果，可減輕約 20~25%的風壓擾動，背風面則較不具效果，但背風面本身其風壓擾動即較低。開放相鄰夾層連通時，如圖 4-32 所示，其減輕的效果更佳，在迎風面及側風面上可減輕約 20~40%的風壓擾動，背風面則較不具效果。

因此，不論其相鄰夾層是否連通，多孔性外牆對於減輕內部建築物立面風壓擾動均具有效果，其中開孔率較低的多孔性外牆其減輕的幅度較高，以本研究實驗範圍而言，開孔率到 60%時，其減輕的效果依然甚為明顯。

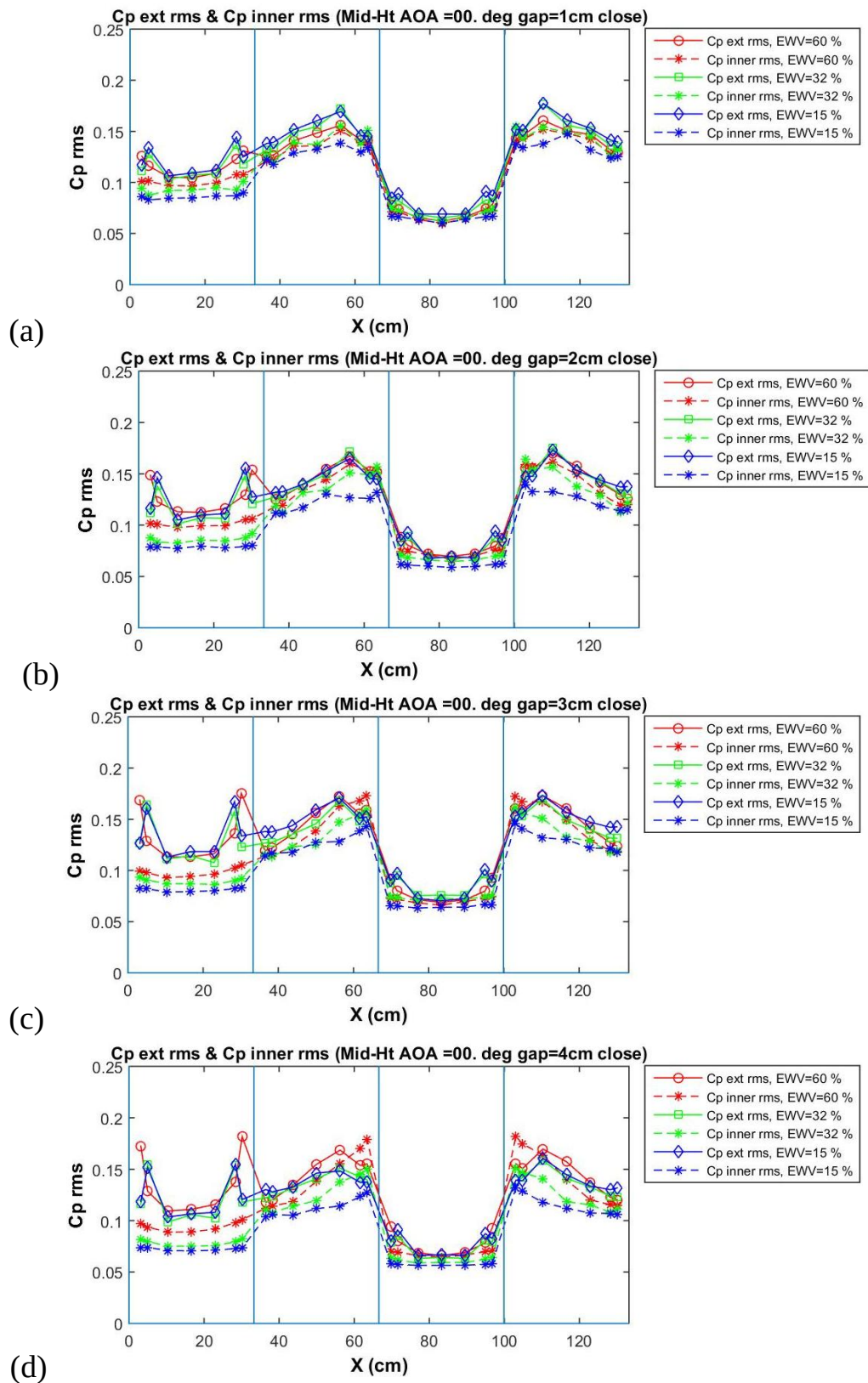


圖 4-31 風攻角 0 度，相鄰夾層空間不連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓之擾動性風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

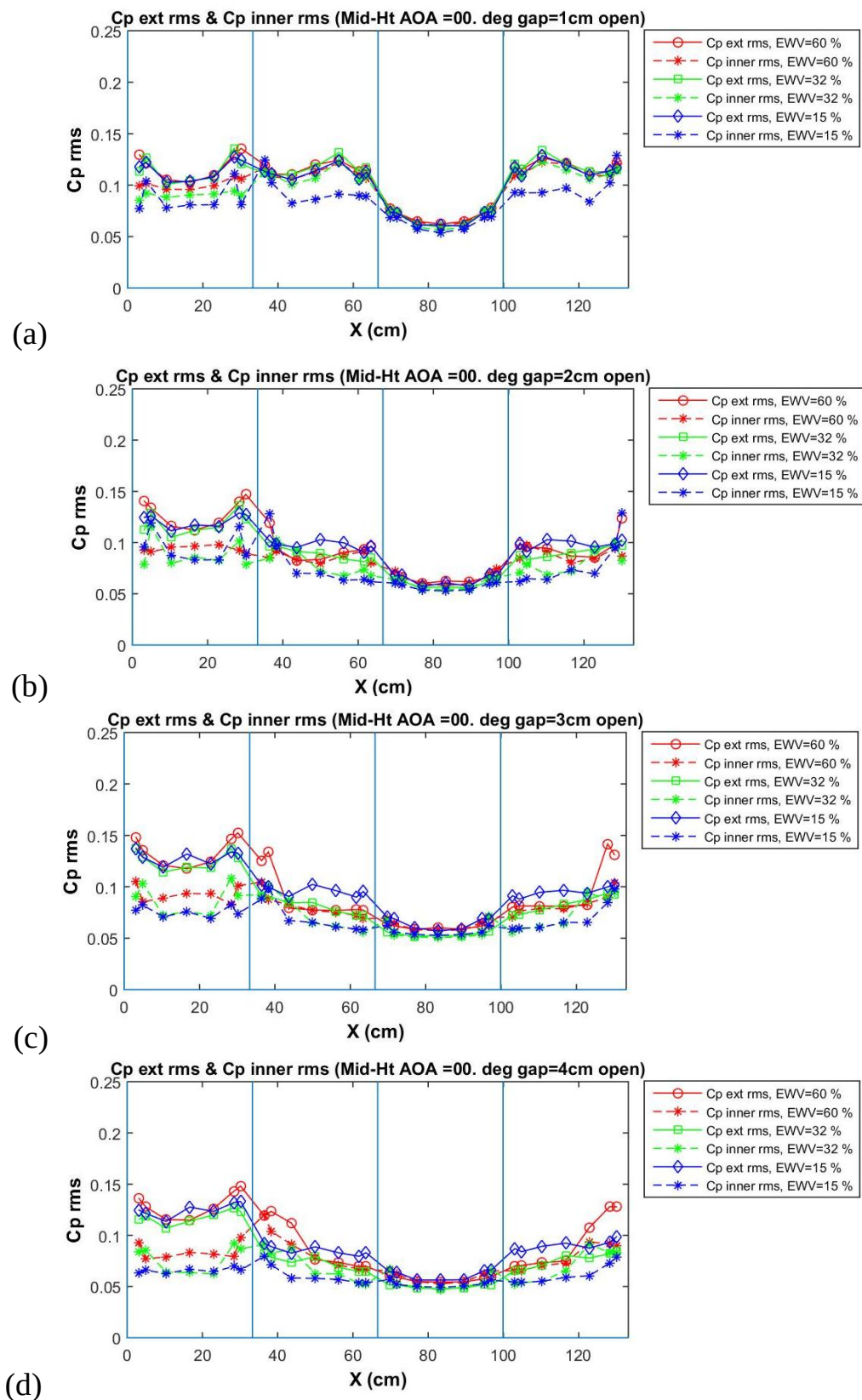


圖 4-32 風攻角 0 度，相鄰夾層空間相互連通時，多孔性外牆外風壓與內部建物立面風壓之擾動性風壓係數於中央高度帶寬分布情形，夾層間隔(a)1cm，(b)2cm，(c)3cm，(d)4cm。

資料來源：本研究繪製

四、多孔性外牆背風面尖峰風壓分布特性

由實驗結果顯示，多孔性外牆背面風壓受多孔性外牆設置條件(開孔率、夾層間隔)而變化，為能建立合適的多孔性外牆背面設計風壓係數，本研究將各不同多孔性外牆設置條件(開孔率、夾層間隔)下，實驗資料推估所得之外牆背面尖峰風壓係數進行整理，以外牆面中央二分之一寬度部分定為中央區域，兩側寬度各四分之一區域定為角隅區域，區分迎風面及側風面兩類，尖峰風壓係數之分布如圖 4-32~圖 4-35 所示。同時分別利用二次多項式推算各區域迴歸公式，迴歸公式型態如(17)式所示，夾層相互連通條件下依實驗值進行迴歸計算，夾層相互不連通情形取用實驗值之平均值。迴歸計算所得之係數如表 4-1 所示，再依此建立建議之多孔性外牆背面設計風壓係數，如表 4-2 所示。

迴歸公式採用二次多項式如下：

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (17)$$

其中

y ：預測的夾層內設計風壓係數(C_{pp})

x_1 ：多孔性外牆夾層間距，取用【間格距離(m)/2】

x_2 ：多孔性外牆開孔率，取用各面之【開孔面積/外牆總面積】

$a_0 \sim a_5$ ：迴歸計算所得之係數

由氣動力實驗結果顯示，多孔性外牆的外風壓係數與開孔的設置型態較無關聯，因此建議考慮多孔性外牆之外風壓設計風壓係數，可參考建築物耐風設計規範關於外牆被覆物設計風壓係數之建

議值。多孔性外牆的背面設計風壓係數，依本研究實驗資料整理，建議值如表 4-2 所示。多孔性外牆之設計風荷載計算，建議採用建築物耐風設計規範關於外牆被覆物設計風壓公式，而將設計內風壓係數改為表 4-2 所建議之係數，並依多孔外牆設置條件(如夾層間距、開孔率、相鄰夾層是否連通等)進行係數的選取，表 4-2 建議之係數亦可採用內插方式估算不同開孔型態之設計風壓係數。對於更高開孔率的多孔性外牆，由實驗成果整理之圖 4-32~4-33 顯示，其變化較趨於定值的形式；同時細部方面，由實驗量測所得的設計風壓係數變化亦顯示高開孔率外牆所受風荷載亦無更增加的變化，對多孔外牆之結構安全而言，更為保守。

表 4-1 多孔性外牆背風面設計風壓迴歸計算成果

迴歸係數	夾層四面連通			
	迎風面		側風面	
	中央區	角隅區	中央區	角隅區
a_0	0.295	1.318	-0.783	-1.734
a_1	-0.724	-2.410	0.617	0.277
a_2	5.311	0.162	-2.506	1.919
a_3	-0.057	0.690	-0.187	-0.032
a_4	-5.923	1.992	2.654	-3.609
a_5	1.169	-0.092	0.049	1.872
R^2	0.921	0.920	0.964	0.990

資料來源：本研究整理

由本研究所得之多孔性外牆氣動力特性及推估之背風面設計風壓係數，未來如納入我國建築物耐風設計規範，可增加於規範 3.3 節說明如下：

“對於矩形平面建築物，如採用增設多孔性外牆構成雙層外牆之造型，其多孔外牆與內部建築物立面平行且開孔大致均勻，可依其

開孔率、夾層間距及鄰側夾層連通等條件，由表 4-2(本研究暫定)中查得合適之外牆背面設計風壓係數，配合本規範之外部被覆物設計風壓係數(規範圖 3-1 與圖 3-2)，視建築物高度，採用規範公式(3.1)或公式(3.2)進行計算。”

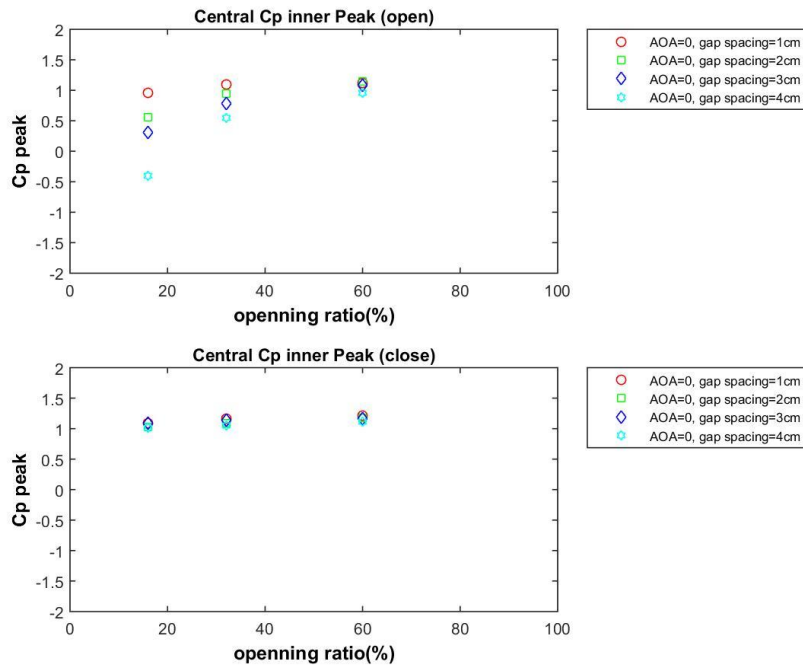


圖 4-32 風攻角 0 度，迎風面中央區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通

資料來源：本研究繪製

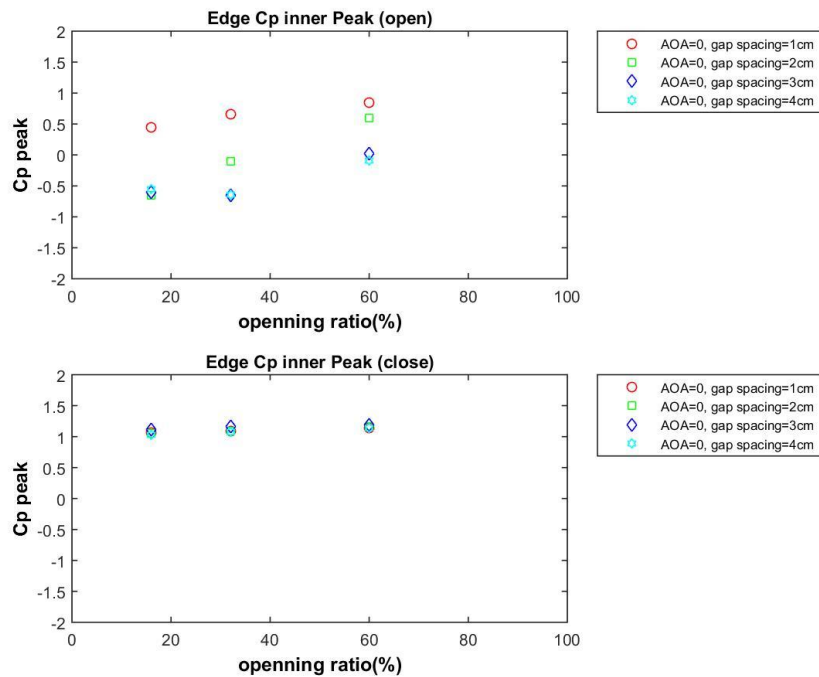


圖 4-33 風攻角 0 度，迎風面角隅區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通

資料來源：本研究繪製

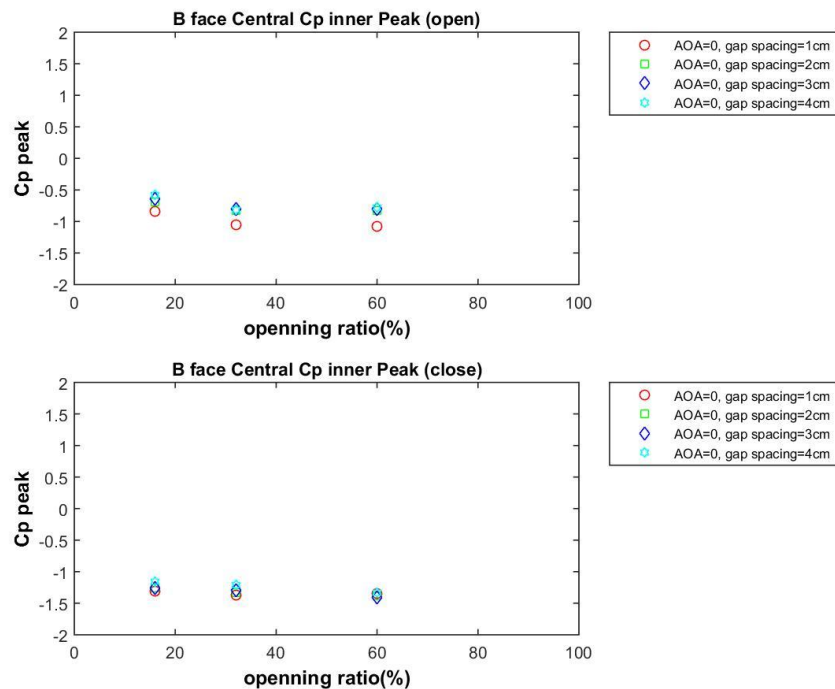


圖 4-34 風攻角 0 度，側風面中央區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通

資料來源：本研究繪製

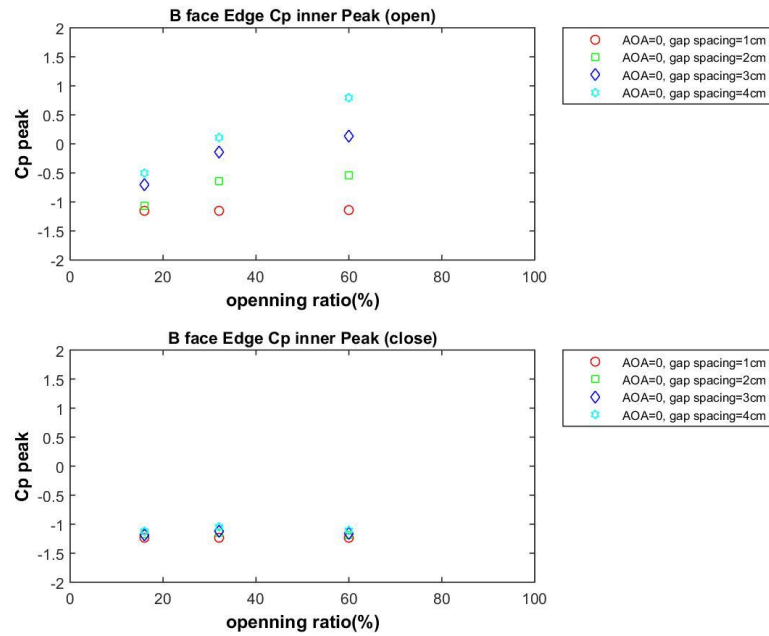


圖 4-35 風攻角 0 度，側風面角隅區域多孔性外牆背風面尖峰風壓係數分布情形，(a)夾層相互連通，(b)夾層不連通

資料來源：本研究繪製

表 4-2 多孔性外牆背風面設計風壓係數建議值

夾層間隔 (m)	開孔率 (%)	夾層四面連通				夾層四面不連通			
		迎風面		側風面		迎風面		側風面	
		中央區	角隅區	中央區	角隅區	中央區	角隅區	中央區	角隅區
0.5	15%	0.67	0.35	-0.83	-1.26	1.1		-1.3	
0.5	30%	1.15	0.50	-1.03	-1.07				
0.5	45%	1.37	0.74	-1.10	-1.05				
0.5	60%	1.32	1.07	-1.05	-1.19				
1	15%	0.35	-0.35	-0.66	-1.00				
1	30%	0.93	-0.20	-0.85	-0.68				
1	45%	1.23	0.03	-0.92	-0.51				
1	60%	1.27	0.36	-0.87	-0.51				
1.5	15%	0.01	-0.70	-0.58	-0.76				
1.5	30%	0.67	-0.56	-0.77	-0.30				
1.5	45%	1.06	-0.33	-0.84	0.01				
1.5	60%	1.19	-0.01	-0.78	0.15				
2	15%	-0.37	-0.70	-0.60	-0.54				
2	30%	0.38	-0.57	-0.78	0.07				
2	45%	0.86	-0.35	-0.84	0.51				
2	60%	1.08	-0.04	-0.79	0.79				

資料來源：本研究整理

第四節 計算範例

本案示範例擬定一棟高度超過 18 公尺的封閉式建築物，其建築外部由四面連通夾層之多孔性外牆構成，設計流程圖參考根據圖 4-36 與圖 4-37，執行多孔性外牆之耐風設計，並於第一節到第五節詳列計算流程，分別為建築物資料與工址風環境、有效受風面積及相對應的外風壓係數之計算、多孔性外牆設計風壓之計算、最大設計正風壓與負風壓之選取，以及多孔性外牆耐風反應之檢核。計算中所考慮的多孔性外牆單元尺寸、繫件安排及孔隙實際形成樣態，如圖 4-38 所示。當多孔性外牆在設計風壓的作用下，檢核其抵抗強度與變形量是否滿足相關規範之規定。若多孔性外牆與其繫件不滿足相關規定，可以藉由重新加勁、增加繫件量、增加外牆強度或減少單元面積來達到設計目標。

目前國內業界在設計具孔隙率外牆之設計風壓時，在本案討論前，多數先以規範內訂定之封閉式或部分封閉式建築計算設計風壓，後採構件或外牆之面積比例對該設計風壓值進行折減，若開口較大者(例如超過 70%)，據悉也有設計者採用 60%比例進行折減。而以本案方式計算出之結果，由於不同開孔率與夾層間隔對應到不同之背風壓係數，並非為固定比例，可提供設計者在設計多孔性外牆風壓時有較準確之結果。

本範例採用建築物為平面尺寸 30 m × 20 m，建築物高度(不含屋頂突出物) $h = 50$ m，多孔性外牆透過率為 60%，其夾層間隔為 1 m，為四面連通狀況。透過性外牆與繫件如圖 4-38 所示。地況條件方面，根據規範 2.4 節，台北市的 $V_{10}(C) = 42.5$ m/s，換算本例建築物高度處風速為 54.1m/sec，相當於 16 級風。上風側地況皆為地況 B，無特殊地形，根據規範式(2.6)， $K_{zt} = 1$ 。

本範例計算以建議之設計風壓係數計算風荷載，如以規範中建議之建築物內部風壓係數計算將會有明顯誤差，實際計算結果比較如表 4-7 所示。

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

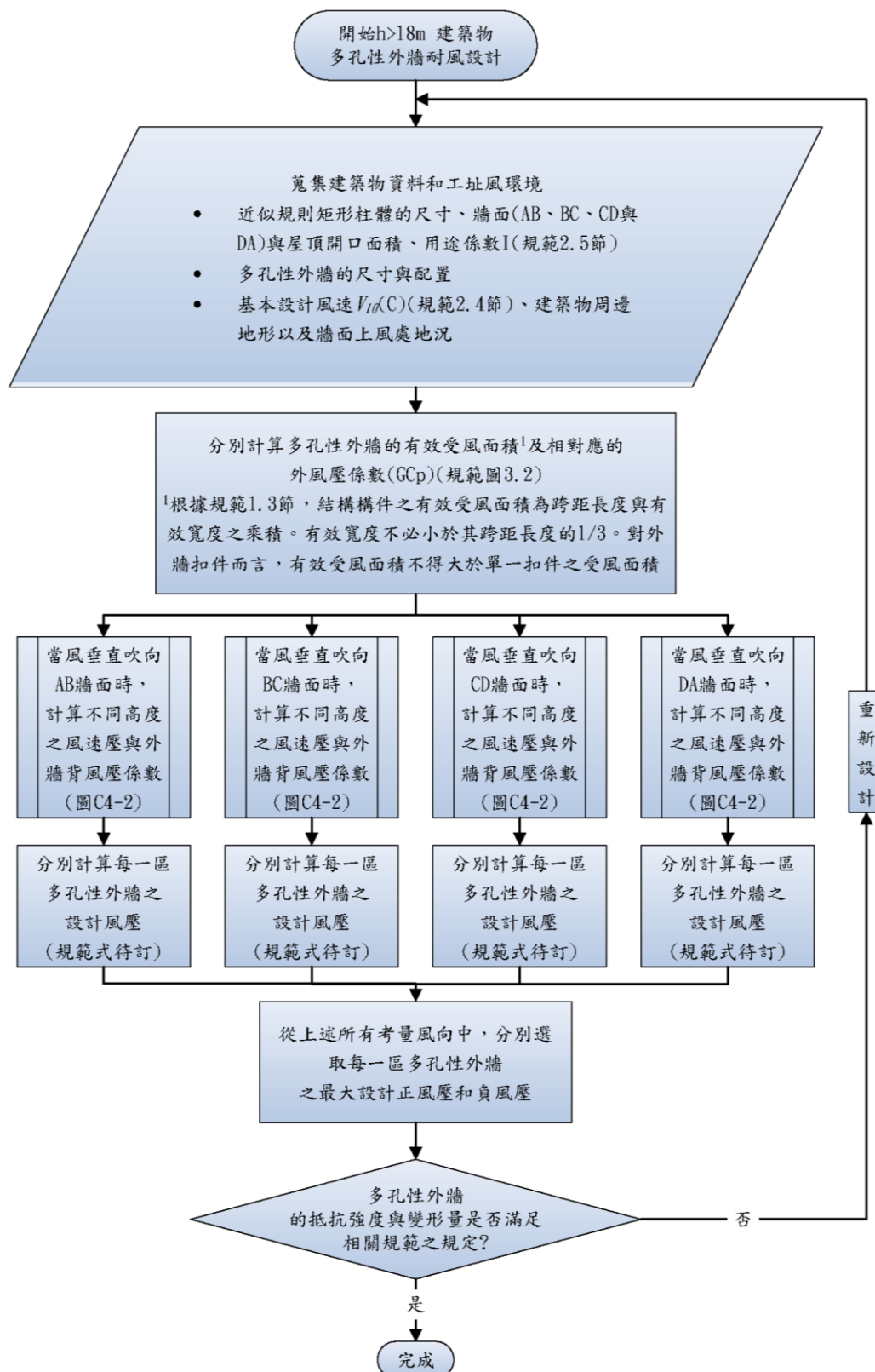


圖 4-36 高度超過 18 公尺之多孔性外牆耐風設計流程圖

資料來源：建築物耐風設計技術手冊

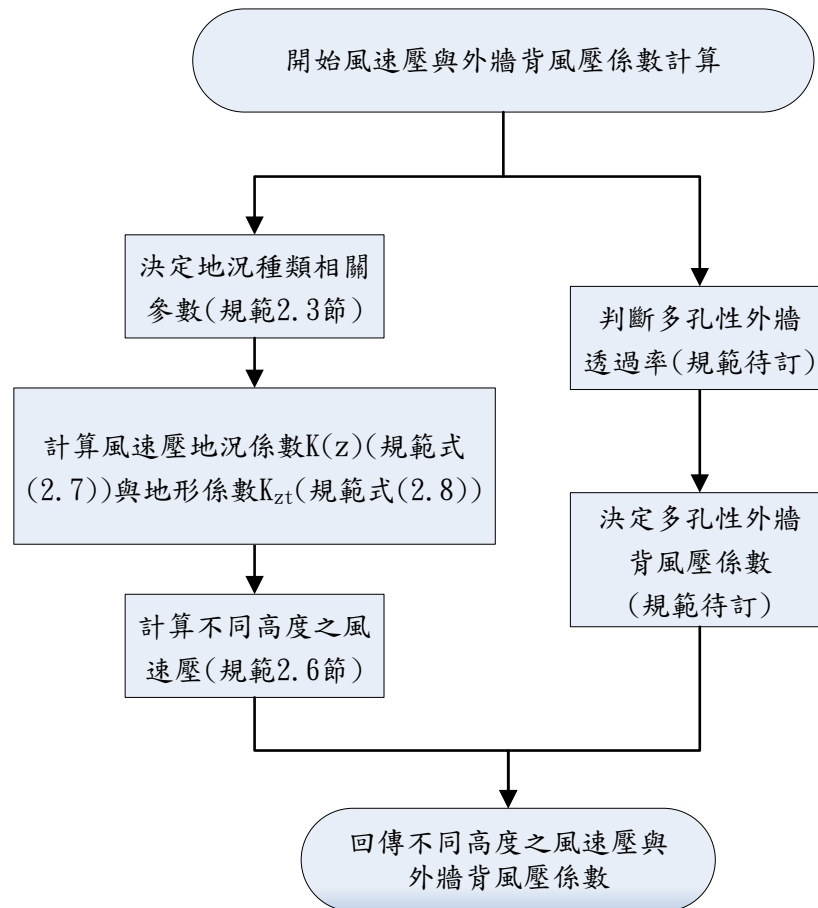


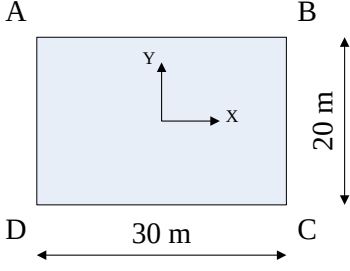
圖 4-37 不同高度之風速壓與外牆背風壓係數計算流程圖

資料來源：建築物耐風設計技術手冊

一、建築物資料與工址風環境

根據圖 4-36，執行耐風設計時，需先蒐集建築物資料與工址風環境，本節擬定建築物資料與工址風環境如下表所示。

表 4-3 建築物資料與工址風環境

建築物資料	尺寸	平面尺寸 30 m × 20 m； 建築物高度(不含屋頂突出物) $h = 50$ m。	
	開口面積	設計者須根據實際可能之狀況判斷開口面積。本例假設各牆面之總面積有 1% 破損而造成開口，其餘無開口。	
	用途係數 I	根據規範 2.5 節， $I = 1.1$ 、 1.0 或 0.9 。本例為住宅，故 $I = 1.0$ 。	
	多孔性外牆	本例多孔性外牆透過率為 60%，其夾層間隔為 1 m，為四面連通狀況。透過性外牆與繫件如圖 4-38 所示。	
工址風環境	基本設計風速 $V_{10}(C)$	根據規範 2.4 節，台北市的 $V_{10}(C) = 42.5$ m/s。 註：換算本例建築物高度處風速為 54.1 m/sec，相當於 16 級風。	
	地況	AB 牆面、BC 牆面、CD 牆面與 DA 牆面上風側地況皆為地況 B。	
	地形	無特殊地形，根據規範式(2.6)， $K_z = 1$ 。若有特殊地形，可參考附錄一的方式計算 K_z 。	

資料來源：本研究整理

二、有效受風面積及相對應的外風壓係數之計算

根據規範 1.3 節有效受風面積 A 的定義可知，結構構件之 A 為跨距長度與有效寬度之乘積。有效寬度不必小於其跨距長度的 $1/3$ 。對外牆扣件而言， A 不得大於單一扣件之受風面積。因為高度超過 18 公尺，可根據有效受風面積與外牆或屋頂查規範圖 3.2 決定外風壓係數。

多孔性外牆單元與繫件

多孔性外牆單元跨距長度為 4 m，有效寬度為 $\max(2\text{ m}, 4\text{ m}/3) = 2\text{ m}$ ，則 $A = 4\text{ m} \times 2\text{ m} = 8\text{ m}^2$ 。單元四個角落的繫件接受該單元產風之風力，並將其傳送至主要風力抵抗系統，因此，對於一個繫件而言，其有效受風面積為多孔性外牆單元面積 $4\text{ m} \times 2\text{ m}$ 除以 4，即 $A = 8\text{ m}^2/4 = 2\text{ m}^2$ 。

外牆分為④區和⑤區，各區示意圖如圖 4-39 所示，外風壓區域之寬度 $a = 0.1 \times \min(B, L) = 2\text{ m} > 0.9\text{ m}$ 。多孔性外牆單元的 $A = 8\text{ m}^2$ ，④區正值和負值外風壓係數分別約為 1.6 和 -1.7，⑤區正值和負值外風壓係數分別為 1.6 和 -3.0。仿照上述多孔性外牆單元外風壓係數的查表方法，可得其繫件之④區和⑤區的外風壓係數。彙整前述不同 A 的外風壓係數，將其列於表 4-4。

三、多孔性外牆設計風壓之計算

參考規範第三章方式，分別在不同來風方向下，計算多孔性外牆所承受之設計風壓；所考慮可能之來風方向包括來風垂直 AB 牆面、來風垂直 BC 牆面、來風垂直 CD 牆面與來風垂直 DA 牆面。但根據第一節可知，由於四個牆面開口率皆相同，四個牆面上風側地況皆相同且建築物周邊無特殊地形，四個牆面同類多孔性外牆的有效受風面積皆相同，因此，各多孔性外牆相同區域之設計風壓會一樣，以下只考慮 AB 牆面的多孔性外牆，根據來風方向分別計算其設計風壓。

(一) 風垂直吹向 AB 牆面

【步驟 1】計算不同高度之風速壓與外牆背風壓係數(圖 4-37)

不同高度之風速壓

當風垂直吹向 AB 牆面時，根據表 4-3，垂直於風向之建築物水平尺寸 $B = 30 \text{ m}$ ，平行於風向之建築物水平尺寸 $L = 20 \text{ m}$ 。根據「建築物耐風設計規範與解說」表 2.2，地況 B 相關參數 $\alpha = 0.25$ ； $z_g = 400 \text{ m}$ 。

$$\begin{aligned} K(z) &= 2.774 \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2\alpha} = 2.774 \left(\frac{z}{400} \right)^{0.5} ; z > 5 \text{ m} \\ &= 2.774 \left(\frac{5}{z_g} \right)^{2\alpha} = 2.774 \left(\frac{5}{400} \right)^{0.5} ; z \leq 5 \text{ m} \end{aligned}$$

根據「建築物耐風設計規範與解說」式(2.8)，計算 K_{zt} ；因工址附近無特殊地形， $K_{zt} = 1$ 。當風垂直吹向 AB 牆面時，離地面 z 公尺高度之風速壓 q 為

$$q(z) = 0.06K(z)K_{zt}[IV_{10}(C)]^2 = 300.63 \left(\frac{z}{400} \right)^{0.5} \text{ kgf/m}^2 ; z > 5 \text{ m}$$

$$q(z) = 0.06K(z)K_{zt}[IV_{10}(C)]^2 = 300.63 \left(\frac{5}{400} \right)^{0.5} \text{ kgf/m}^2 ; z \leq 5 \text{ m}$$

外牆背風壓係數

目前規範內尚未定義此外牆背風壓係數，在此先以 (GC_{pp}) 值代表之。由於經實驗數據分析後，多孔性外牆之外風壓與規範建議值相近，因此外牆外風壓則直接採以規範值進行計算，而在外牆之背風壓係數則參考對應狀況與開孔率之風壓係數圖(表 4-2 內容)，對應該區之外牆背風壓係數 (GC_{pp}) 為中央區 1.27、角隅區 0.36。

【步驟 2】 分別計算 AB 牆面上每一局部多孔性外牆之設計風壓

風垂直吹向 AB 牆面時，AB 牆為迎風面牆。參考規範式(3.2)形式，迎風面牆之多孔性外牆之設計風壓：

$$p(z) = q(z)(GC_p) - q(z)(GC_{pp})$$

舉例而言，考慮 AB 牆面最高樓層⑤區的多孔性外牆單元，其形心離地高度 $z = 48 \text{ m}$ ，則⑤區多孔性外牆單元的 $q(z = 48 \text{ m}) = 104.14 \text{ kgf/m}^2$ 。迎風面牆的外風壓係數要取正值，根據表 4-3 可知位於⑤區的多孔性外牆單元之 $(GC_p) = 1.6$ 。對應該區之外牆背風壓係數 (GC_{pp}) 為 0.36，則該單元設計正風壓為 $p(z = 48) = 104.14 \times 1.6 - 104.14 \times 0.36 = 129.14 \text{ kgf/m}^2$ 。仿照上述 AB 牆面多孔性外牆單元設計風壓的計算流程，可分別計算得到 AB 牆每一多孔性外牆單元與繫件的設計正風壓，其中，計算繫件所設定的 z 值是取對應的多孔性外牆單元形心離地高度。彙整多孔性外牆單元與繫件在不同高度與區域的設計正風壓，將數值分析結果列於表 4-5。

(二) 風垂直吹向 BC 牆面

【步驟 1】計算不同高度之風速壓與內風壓係數(圖 4-37)

四個牆面上風側地況皆相同且建築物周邊無特殊地形，因此，不同高度之風速壓與風垂直吹向 AB 牆面的結果相同。而 AB 面此時為側牆， (GC_p) 為負值，則外牆背風壓係數則參照負值外風壓各區域之 (GC_{pp}) ，對應該區之外牆背風壓係數 (GC_{pp}) 為中央區-0.87、角隅區-0.51。

【步驟 2】分別計算 AB 牆面上每一局部多孔性外牆之設計風壓

風垂直吹向 BC 牆面時，AB 牆為側風面牆。參考規範式(3.2)形式，側風面牆之多孔性外牆之設計風壓：

$$p(z) = q(z)(GC_p) - q(z)(GC_{pp})$$

舉例而言，考慮 AB 牆面最高樓層⑤區的多孔性外牆單元，而 $q(z = 48) = 104.14 \text{ kgf/m}^2$ 。側牆外風壓係數 (GC_p) 應取負值，由表 4.4 可知位於⑤區的多孔性外牆單元 (GC_p) 為-2.8，對應該區之外牆背風壓係數 (GC_{pp}) 為-0.51，則該多孔性外牆單元設計負風壓為 $p(z) = 104.14 \times -2.8 - 104.14 \times -0.51 = -238.48 \text{ kgf/m}^2$ 。

(三) 風垂直吹向 CD 牆面

【步驟 1】計算不同高度之風速壓與內風壓係數(圖 4-37)

四個牆面上風側地況皆相同且建築物周邊無特殊地形，因此，不同高度之風速壓與風垂直吹向 AB 牆面的結果相同。而 AB 面此時為背風面牆， (GC_p) 為負值，則外牆背風壓係數則參照負值外風壓各區域之 (GC_{pp}) ，對應該區之外牆背風壓係數 (GC_{pp}) 為中央區-0.87、角隅區-0.51。

【步驟 2】分別計算 AB 牆面上每一局部多孔性外牆之設計風壓

風垂直吹向 CD 牆面時，AB 牆為背風面牆。參考規範式(3.2)形式，背風面牆之多孔性外牆之設計風壓：

$$p(z) = q(z)(GC_p) - q(z)(GC_{pp})$$

舉例而言，考慮 AB 牆面最高樓層④區的多孔性外牆單元。背風面牆外風壓係數 (GC_p) 應取負值，由表 4.4 可知位於④區的多孔性外牆單元 (GC_p) 為-1.7，對應該區之外牆背風壓係數 (GC_{pp}) 為-0.87，則該多孔性外牆單元設計負風壓為 $p(z) = 104.14 \times -1.7 - 104.14 \times -0.87 = -86.44 \text{ kgf/m}^2$ 。

(四) 風垂直吹向 DA 牆面

根據建築物資料與工址風環境可知，建築物以 Y 軸為對稱軸，BC 牆面與 DA 牆面開口面積相同，BC 牆面與 DA 牆面上風側地況相同，以及建築物周邊地形相同。因此，當風垂直吹向 DA 牆面時，AB 牆面上多孔性外牆之設計風壓，與當風垂直吹向 BC 牆面的結果相同。

四、最大設計正風壓與負風壓之選取

從上述所有考量風向中，分別選取每一多孔性外牆之最大設計正風壓和負風壓。由於本例各外牆相同區域的多孔性外牆之設計風壓一樣，因此，以下針對 AB 牆面的多孔性外牆，分別選取其之最大設計正風壓和負風壓。

舉例而言，考慮 AB 牆面最高樓層⑤區的多孔性外牆單元，根據表 4-5 可知，當風垂直吹向 AB 牆面時，位於⑤區的該單元之設計正風壓為 129.14 kgf/m^2 ；根據表 4-5 可知，當風垂直吹向 BC 牆面、CD 牆面或 DA 牆面時，位於⑤區的該單元之設計負風壓為 -238.48 kgf/m^2 。從前述各考量風向所造成該單元所承受之設計風壓中，選取最大設計正風壓為 129.14 kgf/m^2 為與最大設計負風壓為 -238.48 kgf/m^2 。

仿照上述 AB 牆面多孔性外牆單元最大設計正風壓與負風壓的選取流程，可分別得到各牆面每一局部多孔性外牆之最大設計正風壓與負風壓，各牆面多孔性外牆單元與繫件之最大設計正負風壓如表 4-6 所示。

五、多孔性外牆耐風強度之檢核

當多孔性外牆在設計風壓的作用下，檢核其抵抗強度與變形量是否滿足相關規範之規定。若多孔性外牆與其繫件不滿足相關規定，可以藉由重新加勁、增加繫件量、增加外牆強度或減少單元面積來達到設計目標。

表 4-4 多孔性外牆外風壓係數

名稱	A(m ²)	④區		⑤區	
		正值	負值	正值	負值
多孔性外牆單元	8	1.6	-1.7	1.6	-2.8
多孔性外牆單元繫件	2	1.8	-1.9	1.8	-3.0

資料來源：本研究整理

表 4-5 AB 多孔性外牆單元與繫件之設計風壓 kgf / m^2

單元形心 離地高度 z (m)	$q(z)$ kgf/m^2	風垂直吹向 AB 牆面				風垂直吹向 BC 牆面、CD 牆面或 DA 牆			
		多孔性外牆單元		繫件		多孔性外牆單元		繫件	
		④區	⑤區	④區	⑤區	④區	⑤區	④區	⑤區
48	104.14	34.37	129.14	55.19	149.96	-86.44	-238.48	-107.27	-259.31
44	99.71	32.90	123.64	52.85	143.58	-82.76	-228.33	-102.70	-248.27
40	95.07	31.37	117.88	50.39	136.90	-78.91	-217.70	-97.92	-236.72
36	90.19	29.76	111.83	47.80	129.87	-74.86	-206.53	-92.89	-224.57
32	85.03	28.06	105.44	45.07	122.44	-70.58	-194.72	-87.58	-211.73
28	79.54	26.25	98.63	42.16	114.54	-66.02	-182.14	-81.93	-198.05
24	73.64	24.30	91.31	39.03	106.04	-61.12	-168.63	-75.85	-183.36
20	67.22	22.18	83.36	35.63	96.80	-55.80	-153.94	-69.24	-167.39
16	60.13	19.84	74.56	31.87	86.58	-49.90	-137.69	-61.93	-149.71
12	52.07	17.18	64.57	27.60	74.98	-43.22	-119.24	-53.63	-129.66
8	42.52	14.03	52.72	22.53	61.22	-35.29	-97.36	-43.79	-105.86
4	33.61	11.09	41.68	17.81	48.40	-27.90	-76.97	-34.62	-83.69

資料來源：本研究整理

表 4-6 各牆面多孔性外牆單元與繫件之最大設計正負風壓 kgf/m^2

單元形心 離地高度 $z(\text{m})$	$q(z)$ kgf/m^2	多孔性外牆單元				繫件			
		④區		⑤區		④區		⑤區	
		正風壓	負風壓	正風壓	負風壓	正風壓	負風壓	正風壓	負風壓
48	104.14	34.37	-86.44	129.14	-238.48	55.19	-107.27	149.96	-259.31
44	99.71	32.90	-82.76	123.64	-228.33	52.85	-102.70	143.58	-248.27
40	95.07	31.37	-78.91	117.88	-217.70	50.39	-97.92	136.90	-236.72
36	90.19	29.76	-74.86	111.83	-206.53	47.80	-92.89	129.87	-224.57
32	85.03	28.06	-70.58	105.44	-194.72	45.07	-87.58	122.44	-211.73
28	79.54	26.25	-66.02	98.63	-182.14	42.16	-81.93	114.54	-198.05
24	73.64	24.30	-61.12	91.31	-168.63	39.03	-75.85	106.04	-183.36
20	67.22	22.18	-55.80	83.36	-153.94	35.63	-69.24	96.80	-167.39
16	60.13	19.84	-49.90	74.56	-137.69	31.87	-61.93	86.58	-149.71
12	52.07	17.18	-43.22	64.57	-119.24	27.60	-53.63	74.98	-129.66
8	42.52	14.03	-35.29	52.72	-97.36	22.53	-43.79	61.22	-105.86
4	33.61	11.09	-27.90	41.68	-76.97	17.81	-34.62	48.40	-83.69

資料來源：本研究整理

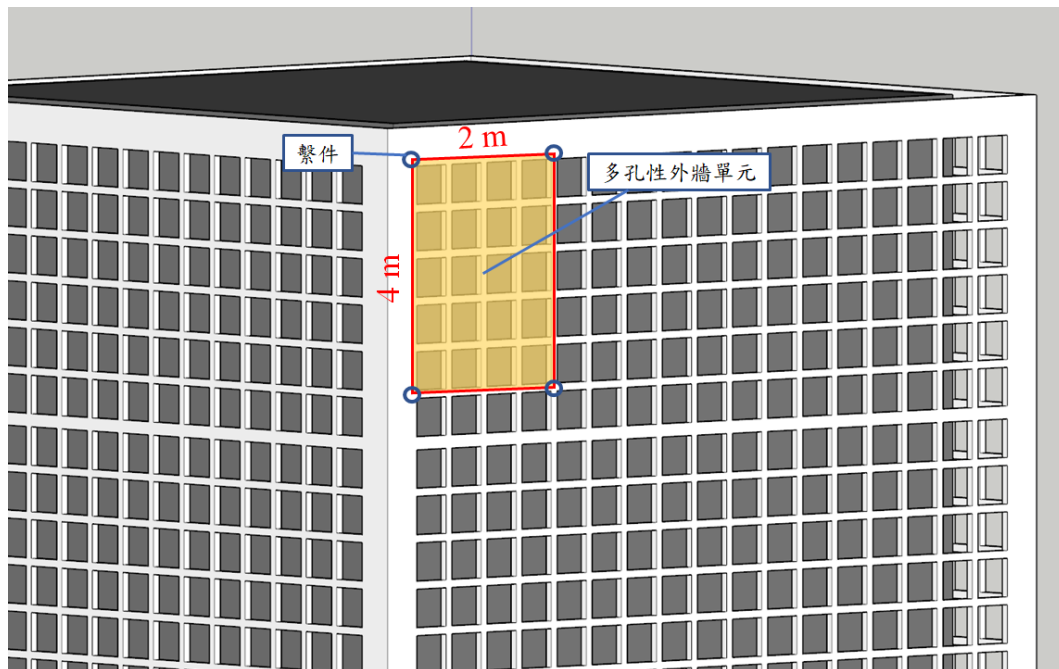
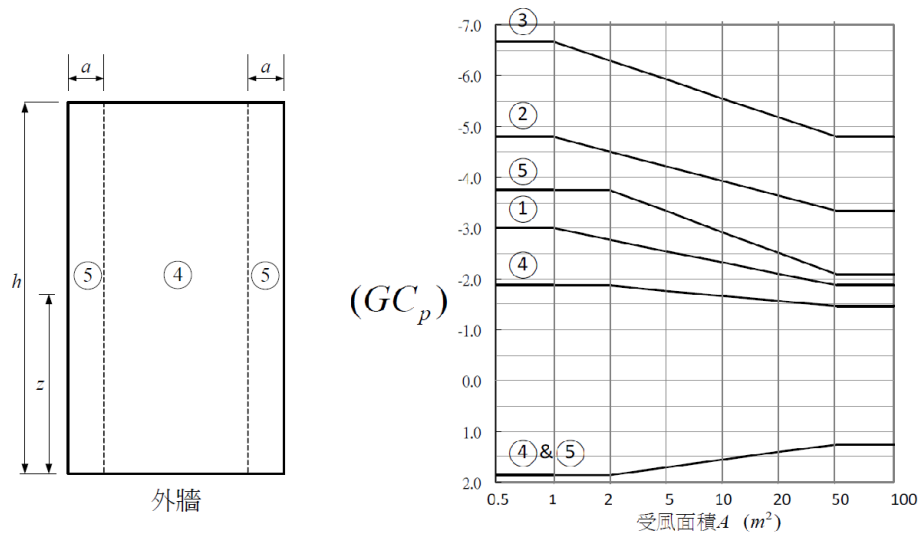


圖 4-38 多孔性外牆單元與繫件位置示意圖

資料來源：本研究繪製



- 註：1. 每個部分應依最大正負壓力設計之。
 2. 若有高於 0.9 m 之女兒牆圍於屋頂四周，且 $\theta \leq 10^\circ$ ，則③區可納入②區處理。
 3. 正值，表示壓力指向表面作用；負號則表示壓力遠離表面作用。
 4. a ：最小寬度的 10%，但不小於 0.9 m。
 5. 若 $\theta > 10^\circ$ ，則設計屋頂所用之 (GC_p) 由圖 3.1(c) 或圖 3.1(d) 決定。

圖 4-39 規範圖 3.2 外牆分區示意圖(參考規範分區設計風壓)

資料來源：建築物耐風設計規範與解說(2014)

表 4-7 本研究建議係數計算結果與耐風規範個內風壓係數計算結果
比較

條件	背風壓係數	風垂直吹向 AB 牆面				風垂直吹向 BC 牆面、CD 牆面 或 DA 牆			
		多孔性外牆單元		繫件		多孔性外牆單元		繫件	
		④區	⑤區	④區	⑤區	④區	⑤區	④區	⑤區
待訂規範	實驗數據	34.37	129.14	55.19	149.96	-86.4	-259.3	-107.2	-337.42
規範	0.00	66.65	66.65	74.98	74.98	-70.8	-124.9	-79.15	-156.21
	0.375	82.27	82.27	90.60	90.60	-86.4	-140.5	-94.77	-171.83
	1.146	114.39	114.39	122.7	122.7	-118	-172.7	-126.8	-203.95
	與待訂規範相對差異								
規範	0.00	93%	-48%	35%	-50%	-18%	-51%	-26%	-53%
	0.375	139%	-36%	64%	-39%	0%	-45%	-11%	-49%
	1.146	232%	-11%	122%	-18%	37%	-33%	18%	-39%

資料來源：本研究整理

第五章 結論與建議

第一節 結論

1. 外部風壓作用主要由建築物周邊流場與來流影響，對於多孔性外牆其上開孔狀況，未能達到改變建物周邊渦流形成與分布的程度，因此外部風壓特徵並未改變。
2. 由實驗結果顯示，風攻角的改變對於多孔性外牆內外各部的尖峰風壓係數分布有所影響，主要亦是因風攻角的變化，對於建物周邊渦流結構有明顯的影響，基於安全考慮，建議之設計風壓係數應以能涵蓋各不同條件下風壓係數值的範圍，本階段實驗成果的討論顯示，以風攻角 0 度時，各面向的尖峰風壓係數變化範圍較廣，因此應可主要以 0 度風攻角的情形下進行設計風壓係數的推估。
3. 夾層相鄰空間不連通狀況下，多孔性外牆所受淨風壓平均風壓係數在本研究夾層間隔距離變化及不同開孔率條件下，平均值均接近零值，呈現接近內外等壓的狀態。
4. 夾層相鄰空間不連通時，多孔性外牆之外部尖峰風壓係數與內部建物立面風壓尖峰風壓係數兩者差異不大，內部建物立面風壓尖峰風壓係數略小於外牆之外部尖峰風壓係數約 0.1~0.2，顯示多孔性外牆對內部建築物所受尖峰風壓作用較輕微。
5. 觀察多孔外牆的外風壓部分，迎風面的正風壓值達到最高，而側風面的負值則最低，且兩者的絕對值接近，因此對於外風壓的考慮，迎風面及側風面風壓作用均應加以計算，正負兩種情形均須考慮。
6. 具備多孔性外牆及夾層間隔的建物，來流透過多孔性外牆的高開孔率將直接影響迎風面的夾層內壓，迎風面上開孔率越

高則直接來流進入夾層內越多；其他面向屬負壓作用，亦透過開孔進入夾層，並在相連通的夾層內有混合的現象，夾層間距的增加，應更有助於此現象的成長，因此影響到迎風面的夾層內部壓力有下降的趨勢。

7. 具備多孔性外牆及夾層間隔的方形斷面建物，四面夾層空間相互連通時，多孔性外牆在迎風面及側風面上，淨風壓尖峰風壓係數的分布有中央區及角隅區的差別，以角隅區尖峰值較高，與多孔性外牆背面風壓分布有相同特徵。
8. 具備多孔性外牆及夾層間隔的方形斷面建物，四面夾層空間相互連通時，以受風作用的強度而言，多孔性外牆對內部建築物具有減輕風荷載的作用，以本研究顯示，開孔率達到60%時，即不具減輕風荷載作用的效用，在此開孔率的外牆，僅對內部建築物角隅區域的風荷載有作用。
9. 不論多孔性外牆形成的夾層是否相鄰連通，其對於減輕內部建築物立面風壓擾動均具有效果：
 - (1).在相鄰夾層不連通的情形下，隨夾層間隔的增加效果增加，且以迎風面及側風面上較具效果，可減輕約20~25%的風壓擾動，背風面則較不具效果。
 - (2).開放相鄰夾層連通時，其減輕的效果更佳，在迎風面及側風面上可減輕約20~40%的風壓擾動，背風面則較不具效果。
10. 本研究以具備多孔性外牆的雙層外牆方形斷面矩柱體進行氣動力實驗，探討不同多孔性外牆安裝條件下，對外牆內外壓的影響，以實驗成果，配合我國建築物耐風設計規範所定義之設計風速迴歸期，建立夾層內壓的設計風力係數建議值，以表格方式呈現，配合規範之外部被覆物局部設計風壓可計算多孔性外牆之設計風力。本研究並建立計算例，以供參考。

第二節 建議

【建議一】

建築物耐風設計規範與解說增加建築物多孔性外牆設計風壓係數及編製建築物多孔性外牆設計風荷載計算示範手冊：立即可行建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：結構技師公會

國內建築物耐風設計規範之設計風荷載計算方式對於建築規劃設計時之風荷載考量至關重要，目前規範對於外部被覆物風荷載已有建議之計算公式及係數，但對於外加具備高開孔率外牆的雙層外牆構型，其外牆應有的風荷載估算方式可加以補充。

如能依據建築物耐風設計規範所定義之外部被覆物設計風壓公式及外部設計風壓係數為基礎，參考本研究關於夾層空間合適的內壓設計風壓係數與說明，可增列於我國建築物耐風設計規範第 3.3 節，並於解說敘述中增加對於多孔性外牆設計風壓係數適用條件之說明。

結合規範條文之增訂，以實際建築案例尺寸、基地條件等具體資料，並在不同應用條件下如何選取參數做說明示範，建立計算示範手冊，有助於規範推廣利用。

【建議二】

建築物創新構型設計與風荷載計算技術開發：中長期建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：內政部營建署

建築技術、材料不斷的推陳出新，針對提升建築性能與節能永續等目標，創新構型及附屬構件的發展亦與日俱進，考慮台灣地區激烈氣候、強風作用等事件甚多，為確保不斷變化的建築新設計作

品之耐風性能，應有相應的安全建議與相關設計流程。

我國建築物耐風設計規範採用的基本風荷載條件隨環境變遷及工程研究的進步，應有同步的修正，並參考國外建築耐風設計規範發展，規範逐步擴充我國建築耐風設計規範適用的範圍。目前對於構形複雜或非傳統造型建築構造物，多需透過風洞實驗進行風荷載評估，而蒐集多年來累積的實驗成果，整理歸納後仍可參用引入於規範中，有助於提高建築物耐風設計規範的適用性。

附錄一 評選委員意見及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 111 年度「建築物多孔性外牆之受風作用特性研究」協同研究計畫案

表 A-1 評選意見及廠商回應一覽表

審查委員意見(依發言順序)		廠商回應
1 徐委員力平	1. 氣動力模型實驗之尺寸效應如何評估? 2. 不同形狀之尺寸形式受風之效應如何評估?	1-1 為能使實驗成果與實際狀況相符，實驗設計需考慮長度縮尺、速度縮尺，並據以推估時間縮尺，以建立合於規範要求回歸期等基本條件的設計風壓係數。 1-2 本研究將依循規範所採用的外壓減內壓形式定義多孔性外牆的設計風壓係數，以典型量體驗證不同開孔條件下對多孔性外牆外風壓及內風壓的影響性，但建築物造型變化各異，本計畫將重點放在多孔性外牆開孔率及間距對內外風壓變化，使用時可以規範或建築物風洞實驗所得外風壓搭配內風壓係數建議值，進行修正後，得
2 劉委員哲雄	1. 風壓作用以您們對建築物的了解，建物高度多少才會比地震力對建物結構的影響為大? 2. 所謂多孔性外牆對減輕建築物外牆風壓擾動的潛力甚大，與一般大樓所採用的預鑄式外牆能夠減低多少百分比?	
3 萬委員俊雄	1. 安裝與不安裝多孔性外牆，對建物本體的影響。 2. 多孔性外牆開孔模擬方式與業界採用材料關聯性。	
4 陳召集人建忠	1. 以前做過的研究成效為何？何以以往作的本所及本部無感。	

	2. 請做出有用有價值有亮點的成果。	到多孔性外牆的設計風壓係數。
		3-1 建築結構整體剛性有隨建築物高度增加而逐漸下降的現象，因此高層建築物受風作用產生的位移反應將較為明顯。建築物風荷載有可能因此大於地震力而控制結構系統的選取與設計，但影響建築物受風力作用的因素除高度外，亦受建築物外型、地況及結構系統等因素影響甚大，較不易建議特定高度值為分界。
		3-2 由文獻中可知，多孔性外牆對於建築物內牆面所受風壓擾動有明顯的減抑作用，本研究將檢討不同開孔條件下內壓的變化，應可進一步了解其減低百分比。
		4-1 安裝多孔性外牆較明顯的功能為保護建築物內牆面受風壓擾動的效果，而由文獻中知，有高樓建築模型安裝多孔性外牆後，小幅度降低建築物風致振動的效果。如未能達到改變建築物周邊剪力流的分布狀況，內外牆分別承擔風力作用，而對於

		建物所受的總風荷載應是相似的。 4-2 本研究其能以開孔率、間距、風攻角等因素檢討多孔性外牆的受風特性，建議設計風壓係數，可推估外牆支撐結構所受風荷載。由先期研究可知開孔形狀的影響不明顯，氣動力實驗考慮的是剛性結構受力狀況，不同材料性質的影響尚未於模型設計中表現。 5-2 本研究將建議建築物多孔性外牆之設計風壓係數及多孔性外牆對內牆面風壓擾動的降低效果，並透過計算範例解釋使用方式，以利應用。
--	--	--

附錄二 期中報告審查會委員意見及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 111 年度「建築物多孔性外牆之受風作用特性研究」協同研究計畫案期中報告審查會

時間：111 年 7 月 14 日 14:30

地點：內政部建築研究所 簡報室

主持人：王所長榮進(王副所長安強代理)

表 A-2 期中報告審查會委員意見及廠商回應一覽表

審查委員意見(依發言順序)	廠商回應
朱教授佳仁	
1.本研究內容探討建築物多孔性外牆抗風結構之設計，並將用設計案例的型態說明，以利業界參採；具工程實務價值，予以肯定。	感謝委員之指導與對研究成果的肯定。
2.建議本研究以圖表明確說明多孔性外牆之孔隙率，對內牆與有開窗的室內面，其結構風載、自然通風及氣壓之影響。	研究成果將整理以圖表方式呈現，明確展示包括多孔性外牆開孔率、間距、相鄰面相連通性等因素對於牆本身風壓係數的影響，以及對內牆面的風壓影響，包括平均風壓係數、擾動性風壓係數等的變化，以提供未來設計多孔性外牆的參考。有關設計風壓係數建議值的呈現，亦將多以圖表方

	式呈現。
3.建議能蒐集國外類似研究之成果，與本研究進行比較。	謝謝委員的意見，本研究將持續蒐集國外相關研究成果及設計實例，作為參考。
胡總監銘煌	
1. 建築物多孔性外牆受風作用下，對建築物本身之主要風力抵抗系統影響較小，但多孔性外牆之設計風壓值則影響自身較大，其結構安全應特別注意。	本研究目標為能建議合適的多孔性外牆設計風壓係數，可運用的方式包括建議內外設計風壓係數或直接建議淨風壓係數以供設計使用，兩種方式的適用性及使用方便性，將利用後續實驗數據加以論證。
2. 建築物多孔性外牆既已含「建築物大型施工架」、「外牆廣告」等常常失敗掉落的工項，建議訂立其設計風壓值時多加說明。	國內在遭受颱風等極端氣候侵襲後，常造成外牆廣告物及大型施工架等損傷事件，此類構造物亦與多孔性外牆所受風荷載行為有關，引此本研究建議設計風壓係數以供設計評估之用，期能減少風災損失。
張教授景鐘	
1.本研究期中報告書成果符合預期成果需求。	感謝委員之指導與對研究成果的肯定。
2.本研究風洞試驗結果顯示夾層內、外風壓無明顯的差異，是否與模型尺寸縮小的效應有關？	本研究採用之模型考慮風洞實驗斷面尺寸的限制，以及合理的模型縮尺計算以設計模型，動力相似率方面參考文獻中類似研究(羅 2020)，建議雷諾數達 60,000 以上，盡可能使實驗誤

	差減少，並避免因縮小模型造成氣動力特徵的差異。
3.同上風洞試驗結果亦顯示建築物多孔性外牆風壓係數亦沒有改變，是否仍與模型尺寸縮小效應有關？本研究可否有實體建築案例可實場量測其資料以供比對佐證？	目前研究結果顯示多孔外牆之外風壓分布狀況未明顯受到開孔率的影響而改變，以及夾層內風壓即使在高達 64%的開孔率狀況仍具有均勻性，此一特性有助於簡化計算過程，但其正確性亦將於後續研究工作中透過不同模型的量測，加以進一步確認。
傅總經理仲麟	
1. 本研究多孔性外牆之設計會取決於此外牆之淨風壓，淨風壓之大小與受風區域（如角隅與非角隅）、開孔率、及外牆與內牆之距離皆有關。	感謝指導，由實驗成果觀察，多孔性外牆所受風荷載與其開孔率、相鄰夾層連通性等密切關係，主導其所受淨風壓的因素為背面風壓的變化，也由實驗結果可觀察到角隅區與非角隅區所受風壓有所不同，未來建議設計風壓係數時，將針對不同設置條件及區域進行建議。
2. 本研究若未來可列出上述參數條件下之淨風壓建議，對實務設計將有很大的幫助。	本研究以多孔性外牆開孔率、夾層間距、相鄰面相連通性等因素對於牆本身風壓係數的影響，以及對內牆面的風壓影響，包括平均風壓係數、擾動性風壓係數等的變化，以提供未來設計多孔性外牆的參考，實驗結果分析將包含淨風壓的資料，可提供參考。

李主任鎮宏	
1.本研究發現外牆開口率大小，不會造成夾層內風壓梯度，對於雙層幕牆(Double-skin facade)的設計予以規範化，將有所助益。	感謝委員之指導與對研究成果的肯定。
2.外牆之內、外風壓設計值因受氣動力影響，於不同位置其大小將不同，建議後續參考現行「建築物耐風設計規範及解說」，將設計風壓係數以圖形方式區域化來呈現。	研究成果將整理以圖表方式呈現，明確展示包括多孔性外牆開孔率、間距、相鄰面相連通性等因素對於牆本身風壓係數的影響，以及對內牆面的風壓影響，包括平均風壓係數、擾動性風壓係數等的變化，以提供未來設計多孔性外牆的參考。有關設計風壓係數建議值的呈現，亦將多以圖形方式表現。
蔡組長綽芳	
1.本研究多孔性外牆係在密閉的牆體再多一層外牆，本案量測外牆及內牆風壓值，建議進一步評估多孔性外牆是否可降低內牆風壓值，如可降低大約百分比是多少？可相對減少內牆玻璃及鋁擠型材料之使用量，以降低成本。	感謝委員之指導，多孔性外牆對於內部建築物牆面所受風壓有減低的效果，本研究將依實驗資料針對期間低的效果進行探討，包括對於設計風壓係數的影響、擾動性風壓的影響等，同時按照不同開孔率、夾層連通性、不同區域等實驗參數進行檢討。

2.本案規劃的試驗量及預期成果，是否足以將此種外牆型態納入我國「建築物耐風設計規範及解說」？建議朝此目標執行。	本案研究目的期能朝向納入我國「建築物耐風設計規範及解說」中有關外牆被覆物設計風壓的建議中，目前有關外部被覆物以提供如帷幕牆等構件設計之用，如考慮建築物外部附設格柵、擴張網、建物整合遮陽設施等物件的耐風性能，有需要加以補充，本案將朝此方向努力。
3.本所於 101 年「低層建築物附屬設施之耐風性能研究」、105 年「建築物整合太陽光電板外牆耐風設計研究」、106 年「建築物附置物之耐風設計評估研究」、108 年「建築物玻璃型陽臺欄杆之風壓係數與風力分析研究」等相關研究成果，建議納入文獻回顧中，以增加研究報告書的廣度與完整性，俾利相關人員閱讀引用。	國內外有關雙層幕牆(double skin fascade)或等壓雨屏牆受風作用後的氣動力特性研究成果，將持續收集作為本研究分析比較的對象。同時，貴所前期相關於建築物外部附屬設施、玻璃型陽台欄杆、太陽光電板外牆等受風作用後的風荷載相關研究成果，亦將整理至文獻回顧的相關章節，以利相關研究人員的閱讀與建構研究之整體性。
王副所長安強	
1.多孔性外牆有成為綠建築的效果，因其相當於一個巨型的外遮陽，同時有一些孔洞，可通風且由內部又可看到一些景觀，具時尚感。	感謝委員之指導，多孔性外牆在遮陽、通風等方面均有一定的效果，具備綠建築設計的潛力。

2.本研究係以多孔性外牆的安全為考量，量測其風壓值。本案可否有機會提昇到法規的層級，讓一些多孔性外牆其要安裝時，需要經過實驗室檢測，以增加實驗室收入。	本研究透過實驗手段探討多孔性外牆的風荷載，並將建議相關的設計風壓係數，透過典型模型的實驗過程，有助於釐清多孔性外牆的氣動力特徵，以及隨不同開孔率、間距、空間連通性等因素的變化。本研究過程同時建立所風雨風洞實驗室具備量測此類建築構件風壓的技術能量，對於較為不規則造型、配置方式特殊等建築設計手法，可能不易以單純構型的設計風壓係數直接引用時，可透過風洞實驗，結合建築物風荷載的量測同時進行量測工作，貴所風雨風洞實驗室之檢測量能亦將有所提升，增加實驗室在國內建築物風載中檢測工作的項目及增加實驗室收入。
--	---

附錄三 專家座談委員意見及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 111 年度「建築物多孔性外牆之受風作用特性研究」協同研究計畫案專家座談

時間：111 年 8 月 26 日 9:00

地點：線上會議

主持人：陳若華

與會人員：(詳回應一覽表)

表 A-3 專家座談委員意見及廠商回應一覽表

審查委員意見(依發言順序)	廠商回應
胡經理家暉	
1. 規範設定:針對內牆風壓之折減,不同的衝孔率可否區分為不同的折減率?這些遮減率會受單顆孔徑大小,內外牆間距等設計參數影響的大小為何(可能需要不同尺度的模型實驗驗證),可否忽略?另外此這折減率可否被直接采用	感謝委員指導,對於不同開孔率產生的風壓折減效果,依開孔率不同而做整理比較,本年計畫採用同大小的開孔方式進行實驗,多孔性外牆夾層間距於第二階段實驗中有四種變化,可據以觀察對夾層空間內壓變化的影響,並可評估影響較大的因子。 氣動力實驗量測對象為多孔牆外壓與夾層的內壓,實驗結果論證的是內外壓差,因壓差而引起的影響性,在風雨狀況下應有相同的表現,傳統等壓雨屏牆

在風雨測試(風洞模型因種種限制往往內外風壓沒太大差異)?	的設計亦是類似觀念，因此如產生內外壓力非常接近時，應具有類似等壓雨屏牆防雨的效果。
2. 經濟效應:承接上述的折減率，這可以直接理解為內牆系統結構性優化的直接因子，來達到更薄更輕的材料運用，從而體現其經濟效應，業主方才更有意願採用多孔性外牆。另，外板的部分若也能證實外風壓折減掉背風壓而達到材料的經濟化，也值得去探索。目前業界所有空縫系統內背板也可以納入考慮(可定義衝孔率到多少才會被視為“多孔性”)。	感謝委員指導，在多孔性外牆遮蔽效應下，對於內部建築物牆面的設計風壓係數所產生的折減及擾動性風壓的下降，確實有助於減少內部牆面的材料，以及等壓效果可使用較輕薄的材料於多孔性外牆設計，依此觀念對於多孔性外牆可提出其經濟上的價值。多孔性外牆的風壓減少可來自因夾層連通而引發的夾層內來自不同面向壓力混合的現象，而使風壓負擔減少，特別是迎風面上最為明顯。而高的開孔率將促使等壓現象發生及對內部建築物牆面風荷載遮蔽效果反而減少現象，最佳化的設計參數，上需更多的實驗佐證。 我國建築物耐風設計規範中部分封閉式建築物的定義，包括迎風面外牆開孔總面積(A_o)大於非迎風面外牆總面積(A_{gi})的 10%及迎風面外牆總面積(A_g)的 1%等要求，亦可作為實驗設計參考。
3. 實踐性:在土地價值高飆的年代，法規往往與設計良意形成很大的衝突。希望內政部可以統籌並與建管局可以針對“多孔性/雙層	感謝委員指導，多孔性外牆或雙層幕牆對於建築物外皮層的設計有很大的創意發揮空間，同時具有節能的潛力，如可由建築管理角度來省思設置多孔性外牆之安全性、是否計入容積率等。為能推廣計畫研究成果，應由可能的設計、建

幕牆”外牆的容積問題，建蔽問題公開討論並納入更多實務想法，讓此類研究更具實踐性。另外，在綠建築的計算上，外被覆物也具有相當的隔熱性能，若能納入計算裏，“多孔性”外牆在永續思考上才能在此等審核階段被彰顯出來，也比較利於推廣。	造者包括建築師、技師、工程顧問公司及建商等，探討其思考角度。
林技師怡均	
1.背風壓與內牆風壓的差距情形如何?	由目前實驗成果資料顯示，多孔外牆背面風壓與內牆面風壓兩者相當近似，且其相關性良好，此特性同時具有簡化模型設計的優點，但對於更大的間距其差異情形則尚需更多的實驗證據。
2.孔隙率的案例，可否配合實驗開孔率16~64%，而為三種案例。	研究成果將建立實例計算，配合開孔率的計算或由實驗資料建立不同開孔率建議設計風壓係數後進行實例計算，均將納入考慮。
3.沒有孔隙外殼的條件下，表現為何?	後續實驗規劃，將可搭配完全無開孔的模型，比較其外風壓。
4.量測結果為平均值，是否考慮主要頻率的改變?	本計畫考慮之外牆以剛性體為主，亦應考慮渦流擾動造成牆面振動及結構共振的問題。

5.孔隙外牆安裝的固定方式，其力量傳遞方式如何考慮？	本研究建立多孔性外牆設計風壓係數的計算方式與建議係數，將利用實例方式呈現計算與設計扣件考慮方式，並考慮合理的應力傳遞系統。
林技師建全	
1.依據試驗結果所得內牆風壓以開孔率 32% 為最大，似無規律，後續建議風壓係數則以最大值為建議值，作為規範修訂或業界採用之依據。	為能兼顧較極端的風荷載，將考慮較為保守的設計風壓係數建議值，因此以實驗中變化較劇烈的值進行設計參數的迴歸，建立的設計值將盡可能的包含較臨界的設計條件。
游教授瑛樟	
1. 研究方向符合建築設計發展趨勢，具有研究價值。	感謝委員指導與肯定。
2. 研究成果雖然對於安全性相關性較小，但是對於建築外牆性能與永續發展具有參考價值。	多孔性外牆或雙層幕牆對於建築物的結構安全性影響較小，此類外皮層的設計有很大的創意發揮空間，同時具有節能的潛力，對於營造都市風貌與綠建築的應用均有其價值。
3. 開孔尺寸與密度對於風壓影響的敏感度，可能具有研究價值，建議進行延伸討	目前階段研究採用一致的開孔條件，變化不同的均布開孔數量達到變化開孔率的效果，由文獻中討論矩形開孔與圓形開孔似無明顯差異，但更大差異的開孔

論。	尺寸是否有所影響，後續研究可延伸探討。
4. 正負風壓的影響性具有不同的建築意義，建議分離檢討。	本研究為顯示風壓強度的比較，採用絕對值方式進行相比，實際建物設計上，受到正壓與負壓對於門窗等確實仍有不同的意義，將修正內文註記其用於比較風壓強度的角色。
鐘主任光民	
1.可簡略說明本研究使用之多孔性外牆與常見之設計(如格柵、遮陽板等)的相似性。	本研究採用均勻開孔的多孔性外牆模型進行討論，由文獻中顯示矩形或圓形開孔形式未明顯影響氣動力特性，因此以多孔板表現常見如格柵、平貼廣告物、雙層幕牆等外部與背面風壓分布，以進一步歸納合適的設計風壓係數。
2.可綜整開孔率對內風壓的效應。	本研究顯示開孔率對內風壓有明顯的影響，後續第二階段實驗成果，配合其他實驗參數共同建立內風壓的建議值。
3.可簡略說明如何評估內牆面風壓擾動?	本計畫實驗成果資料包含平均值、擾動值及尖峰值，尖峰值主要用於設計風壓係數的估算，內牆面擾動性風壓係數受多孔性外牆影響，亦可由實驗成果中加以歸納，將於後續報告中進行討論。
陳教授振華	
1.本案成果非常豐富且實用符合研究目標。	感謝委員指導與肯定。
2.有關本案研究成果中	期中成果中由多孔性外牆背面風壓分布

提及可簡化實驗模型確實可減少許多工作，建議期末可將此一成果之優點與影響度說明。	及內部建築物牆面風壓分布的比較，顯示兩者相似度極高，因此對於後續研究的模型設計可依其風壓孔布設的實際數量限制或需求密度加以調配，簡化兩面均需布孔的手續，期末報告中將加以補充說明。
3.多孔外牆開孔形式是否影響內部建築物表面風壓的分布？	本研究採用均勻開孔的多孔性外牆模型進行討論，由文獻中顯示矩形或圓形開孔形式，未有明顯影響內部建築物風壓分布及氣動力特性，本研究模型設計考慮風壓孔安排的限制，盡量縮小間格寬度、採用方形開孔等方式，最大可達 64% 的開孔率。
蘇技師原模	
1.建築物外牆開孔率若接近 0 時，與外掛石材的情況類似，那本研究計畫是否適合外掛石材設計。	參考我國建築物耐風設計規範定義，所謂部分封閉式建築物的定義，包括迎風面外牆開孔總面積(A_o)大於非迎風面外牆總面積(A_{gi})的 10%及迎風面外牆總面積(A_g)的 1%等要求。如將此標準引用於多孔性外牆的情形，以探討其夾層內部風壓變化時，開孔率仍需大於規範要求，因此對於開孔率接近 0 的條件孔其適用性存疑，建議應有更進一步極低開孔率的實驗成果加以討論。
2.一般在設計階段不太會決定外牆的開孔樣式，是否有建議最保守	本研究採用均勻開孔的多孔性外牆模型進行討論，由文獻中顯示矩形或圓形開孔形式，未明顯影響內部建築物風壓分

的開孔情況。	布及氣動力特性，本研究採用方形開孔，接近雙向格柵的開孔形狀。
3.建設公司常會問這個設計是對應到幾級風，是否可增列這個表格(像幾級地震)比較容易跟非專業人士說明。	感謝委員建議，為能有助於推廣及理解風速的意義，用風級方式呈現更為方便，後續的計算範例可加註考慮的高程為至相當於幾級風，更有助於建立概念。
4.計算流程盡量簡化，分區不要分太多，一般我們在設計時，會以最大的那個區為標準進行細部設計。	研究成果之呈現以供工程師簡明易用為原則，避免繁瑣的公式，計算流程盡量簡化、分區不要太多，並以計算範例說明，以利業界參採。
5.在業界實作一般會以高度做級距的區分，也就是幾樓到幾樓用什麼種的材料尺寸，是否也可納入考量。	由建議的設計風壓係數可推估不同高度位置的設計風力，進行結構扣件設計時，即可參考其荷載大小，並進一步決定不同高程區段所需用桿件尺寸。
6.建議提供計算例或計算流程(含套用的公式)。	本案將於期末報告中以實例計算說明其計算流程，規劃應用本研究設計風壓係數的方式，為兼顧目前規範已有的設計建議，將以結合現有設計計算流程及公式型態為主，減少與既定的設計流程差異，方便使用。
林執行副總經理郁芳	
1. 希望未來研究數據	研究數據將以簡易公式或表格方式呈現

可變成簡易公式關於多孔性外牆設計風壓值(受力與升力) 並提供結構技師使用結構荷載及降低建築體第二層表皮結構鋼構預算。	多孔性外牆設計風壓值，提供結構技師用於結構荷載計算，較精確地掌握其風荷載有助於降低建築體第二層表皮結構鋼構預算。
林技師家荷	
1.實際應用人員，開孔率若超過本案內容如何考量？	本研究建立多孔性外牆設計風壓係數基於氣動力實驗所得資料加以歸納，對於超出範圍的需求，本研究於歸納係數時視其變化趨勢，如有收斂於定值趨勢的尚可應用，屬於發散情形則不建議以外推方式估算。
2.若開孔率不均勻該如何討論？以最大最小或平均值？	本研究使用的多孔性外牆開孔方式為均勻開孔，由文獻研究顯示矩形開孔與圓形開孔影響差異不大，因此實際應用時以平均開孔率考慮應屬合理，但對於差異非常大的開孔布局，其可用性尚待檢討，亦可考慮針對個案進行風洞實驗以精確掌握其風壓變化。
郭研究員建源	
1.驗證後續可到造風機進行實尺寸構造物進行試驗	感謝委員指導，本所造風機進行實尺寸的驗正對於研究成果的可信度或修正均有甚大的助益，後續可配合儀器使用時

	間，加以驗證。
蔡組長緯芳	
1.難得建築師技師參加，可蒐集業界目前如何使用設計雙層帷幕防火問題。	業界專家針對雙層帷幕防火問題提供實際經驗與寶貴意見，可納入後續建築管理方面的研究中加以討論。
2.目前有關多孔性外牆或雙層帷幕牆等受到建築管理的制度面，宜加以了解，掌握可行的設計做法以利推廣。	可由建築管理角度來省思設置多孔性外牆之安全性、是否計入容積率等。為能推廣計畫研究成果，應由可能的設計、建造者包括建築師、技師、工程顧問公司及建商等，探討其思考角度。 (註記：目前關於不同類型之多孔性外牆計入容積的考慮略有不同，分述如下： - i.格柵類型與遮陽板類型由外皮至內牆中心線2m 內不計入容積。 - ii.雙層幕牆(Double-skin facade)類型與雨屏牆(Rain-screen wall)類型取外牆外緣至內牆內緣之中心線計算地板面積，屬於部分計入容積率。 - iii.沖孔板類型如定義為裝修外牆且上無頂蓋，不計入容積率。 - iv.外牆平貼式廣告物屬雜項工作物，要申請雜項執照，不計入容積率。)
王副所長安強	
1.建請考量本案研究成果應用需連結到建築主管機關的需用情形，台灣處於亞熱帶地	感謝委員指導，目前建管法規對於多孔性外牆的管理基於其安全性較無疑慮，以外牆裝飾物視之，因此不計入容積亦無審查機制。基於建築物外加附屬構件

區，政府推動綠建築外遮陽，節能減碳，多孔性外牆如無安全疑慮，常被視為外牆的裝飾物，不計入容積，而不審查，也不會納入建築執照之變更程序，亦即政府沒要求審查，技師自然無需計算多孔性外牆的耐風作用。	的安全考量，避免極端氣候作用時，類似廣告招牌墜落等危害潛勢，在有建築物節能、遮陽等考慮時，建築物外殼設置多孔性外牆，建議宜有合適的耐風性能評估，以利安全考量。
2.本研究案除進行教育功能之基礎研究內外牆之受風情形外，選用的模型未顯示樓層高度或說明普遍適用性，或為與會專家提到非結構但有防護功能之外牆。建請須留意結果是否為建築主管機關為安全理由而要求進行的評估審查。	實驗用模型為能強調其氣動力特徵，因此採簡單構型設計；為避免高度方向的三維流場影響，實驗採用均勻紊流場及模型中央高度處之實驗成果討論各種不同配置方式對氣動力的影響，並推估其風荷載。建議的風壓係數採用無因次化表現，可利用實場尺寸、地況等因素加以推算合於實際尺寸應用的風荷載。研究成果具教育功能之基礎研究性質，提供業界採用此構型設計時可評估受風作用之安全。

附錄四 期末審查會議委員意見及廠商回應一覽表

內政部建築研究所 111 年度「建築物多孔性外牆之受風作用特性研究」協同研究計畫案期末審查會議

- 一、 時 間：111 年 10 月 27 日(星期四)下午 9 時 30 分
- 二、 地 點：採實體及視訊併行會議(實體會議於本所簡報室)【新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓】
- 三、 主持人：樂主任秘書中丕
- 四、 與會人員：(詳回應一覽表)

表 A-3 期末審查會議委員意見及廠商回應一覽表

審查委員意見(依發言順序)	廠商回應
朱教授佳仁	
1.本研究成果有助於多孔性外牆耐風設計，具有工程實務價值，應予以鼓勵。	感謝指導
2. 建議可將實驗結果整理彙整，計算出一個有孔隙外牆與無孔隙外牆風壓係數之比值，讓工程師可由「建築物耐風設計規範及解說」中無孔隙外牆之風壓，換算成有孔隙外牆的風壓，以利建築設計。	感謝指導，本研究結果顯示多孔隙外牆的外風壓係數採用規範建議之無孔隙外部被覆物設計風壓係數應屬合理，因有開孔率影響，受多孔外牆受風面積會較低。如以無孔隙外牆形式計算與有孔隙外牆計算，兩者還有內風壓係數的考慮，如無孔隙外牆搭

	配目前建築物內部空間內風壓係數計算，比較多孔外牆採用本研究建議之背風面風壓係數計算，以本研究計算範例，兩者有明顯差異，比較之數據增列於成果報告表 4-7(P.106)，尚難以歸納出較簡潔的變化趨勢。
胡總監銘煌	
1. 本研究結論對多孔性外牆之「雙層外牆設計」有實用價值，對高層建築創新構型設計，即新型雙層牆設計，亦有幫助。	感謝指導
2. 建議同屬多孔性外牆之「建築物外殼附置物」研究，如大型施工架、外牆廣告、建築物整合太陽能光電板應用等亦很重要，也要加強研究，才能編製成「建築物多孔性外牆設計風荷載計算示範手冊」。	感謝指導，未來進一步編製到手冊階段，將擴充適用範圍，包括不同類型的多孔性構造物，以利如大型施工架、外牆廣告、建築物整合太陽能光電板等之耐風設計考量亦可加以參考應用。
林技師建全	
1. 依據試驗結果所得內牆風壓以開孔率 32% 為最大，似無規律，後續建議風壓係數則以最大值為建議值，作為規範修訂或業界採用之依據。	感謝指導，本研究成果顯示，高開孔率的多孔性外牆其風荷載有下降的趨勢，為保守設計結果，採用尖峰風壓係數進行歸納，建立多孔外牆之背風面設計風壓係數，亦朝向納入建築物耐風設計規範與解說及建立設計手冊努

	力。
張教授景鐘	
1.本研究期末報告，符合預期成果需求。	感謝指導
2.第四章 P.89 計算範例中文字敘述段落重複，請明確說明範例資訊如高度、尺寸、全場環境…等。另 P.99 之圖 4-38 亦無相關說明。	感謝指導，移除重複段落，並補充說明範例中使用的建築物尺寸、周邊地況等。有關圖 4-38 之說明亦增加說明補充於計算範例之敘述中。
3.圖 4-4、圖 4-5 請補充說明實驗配置與尺寸定義。	圖 4-4 及圖 4-5 顯示模型 B 中央帶寬區域在比較不同間距、連通與否等條件下的孔性外牆背面風壓與內部建物立面表面風壓的尖峰值狀況，圖面上所示 gap 之公分數值，代表夾層間距之距離，同時於圖名說明不同面相夾層是否連通，其中不同量測位置的定義如圖 4-2 所示。相關敘述並補充於 P.43 之段落說明中。
4.本研究結論請盡量精簡，具體量化。	感謝指導，結論部分於結案報告中更進一步精簡具體。
方教授富民	
1. 本研究針對建築物多孔性外牆，以風洞模型實驗的方法進行風載重試驗，分析外殼所受風壓載重及內層牆表面風壓，進而建議設計風壓係數，	感謝指導

以供相關設計之參考，深具工程應用價值。	
2. 目前實驗多孔性外牆採用均勻開孔形式，有關開孔大小或形狀是否會對風力結果造成影響，建請說明。	本研究採用均勻開孔方式製作多孔性外牆模型。有關不同開孔形狀及分布，依據文獻及前期研究顯示，因夾層空間會產生氣相平均效果，當開孔面積接近時，形狀的差異近似均勻分布，對內牆面風壓分布的影響並不明顯。
3. 研究中取用模型半高位置檢討風壓係數之分布與變化，其代表性如何？	本研究採用之流場條件屬均勻紊流場，其紊流強度接近地況 C 近地表的十分之一高度層區域，以模擬一般中等高度建築物之流況，採用模型中央高度帶寬之風壓係數作為比較，為避免因模型本身近地表剪力流及頂部三維分離流等影響，獲得多孔性外牆影響流況下的風壓係數較具代表性。
4. 本研究對於多孔性外牆所受風荷載採用風壓係數方式表現，至於在頻率域方面的表現，是否也可加以檢討	感謝指導，本計畫進一步分析外牆風壓的頻譜，增加討論外牆風壓頻譜特性的說明及附圖於 P.66~P.68，印證有關風壓係數與開孔率影響的關係。
傅總經理仲麟	
1. 目前許多建築物為展現其設計特色，在立面處會製作許	感謝指導

多雙層牆元素，因此本研究對於提供外層牆之耐風設計頗有助益。	
2. 本研究結論列出外層牆背面之極值風壓，最後設計採用外層牆正面極值風壓與背面極值風壓差，作為設計風壓，是否已考量兩者相關性並取保守值設計。	實驗同步量測外層牆內外部風壓資料，比較外部風壓與內部風壓之相關性，分析結果顯示相鄰夾層連通時，角隅區內外風壓之相關性略降，其餘區域均達 0.9 以上，顯示其內外尖峰發生具有極大的相關性，因此採用外風壓尖峰值減內風壓尖峰值的作法，屬較為保守的考慮方式，但與相關係數表現實際情形視之，尚未至過度保守的狀況。
3. 因本研究採建築中間高度處之風壓進行分析，但在接近屋頂處的外層牆，其背面壓力受到屋頂分離流影響，可能風壓特性與外風壓有明顯不同，是否應另外考量？	接近屋頂高度處外層牆的背壓受到三維分離剪力流的作用，與外部風壓有所不同，採用迴歸計算所得之內部設計風壓係數，但對於特殊開孔(如懸空)，建議可配合建築物風動實驗進一步檢覈。研究建議的設計風壓係數計算方式，係依循目前我國「建築物耐風設計規範及解說」之外牆被覆物考慮方式，計算公式未作大幅改變。主要考慮能提供與其他構件設計風壓較一致的思路，融入目前規範中。

中華民國全國建築師公會 張建築師欽烽	
1. 錯漏冗字請再核校。	感謝指導，報告再檢核避免錯漏字及重複文字。
2. 建築技術規則提到，外牆遮陽板二分之一以上透空，且其深度在二點零公尺以下者，不計入建築面積。報告中透空率設訂在 15%~60%，是否能延伸論述 70%、80%、90%依然能得出同樣結論。	由本研究實驗數據顯示，如開孔率進一步提升，對於多孔性外牆風荷載而言似無明顯提升或變化，因開孔率甚高情況下其受風作用相對較低，實驗結果顯示，到 60%已趨於定值，因此由公視可推得更高開孔率的建議值，但其變化不大。
中華民國全國土木技師公會全國聯合會 陳技師建民	
達成預期成果，期待「建築物多孔性外牆設計風荷載計算示範手冊」能及早編製以供業界使用。	感謝指導
郭副研究員建源	
1. 本研究之應用性如要擴展，建議應清楚定義多孔性外牆形態，以及計畫成果將如何應用。	本研究採用均勻開孔方式製作多孔性外牆模型。有關不同開孔形狀及分布，依據文獻及前期研究顯示，因夾層空間會產生氣相平均效果，當開孔面積接近時，形狀的差異近似均勻分布，對內牆面風壓分布的影響並不明顯。同時於計算範例之說明中，加強說

	明實際應用的外牆型態與構件安排，以利應用。
2. 研究報告對於設計風壓的思考邏輯，基本上仍依循「建築物耐風設計規範及解說」，建議納入規範以供修訂使用。	研究建議的設計風壓係數計算方式，係依循目前我國「建築物耐風設計規範及解說」之外牆被覆物考慮方式，計算公式未作大幅改變。主要考慮能提供與其他構件設計風壓較一致的思路，如融入目前規範中，可以擴充被覆物形式，或補充建議設計風壓係數表格方式進行。
蔡副研究員宜中	
1. 本研究報告排版多處不符本所規定之報告書格式，應加以修正。	感謝指導，報告已再檢核，依本所規定之報告書格式加以修正。
蔡組長綽芳	
1. 本研究成果建議納入「建築物耐風設計規範及解說」，並研提相關條文及解說。	感謝指導，成果報告第四章第二節(P.89)作成建議之設計風壓係數，以表格方式呈現，並增列建議相關規範條文及解說內容，以供後續規範修訂內容參用。並說明依循目前我國「建築物耐風設計規範及解說」之外牆被覆物考慮方式，計算公式形式未作大幅改變，仍採用外風壓減內風壓方式計算，其中外風壓係數採用目

	前外牆被覆物設計風壓係數，內風壓係數則使用本研究成果建議之背風面設計風壓係數。
樂主任秘書中丕	
1.本研究報告中有提出未來可編製「建築物多孔性外牆設計風荷載計算示範手冊」之建議，如屬後續工作，建議內容宜有明確說明。	感謝指導，對於建築物耐風設計規範中增加相關建築物多孔性外牆設計風壓係數建議值及研擬計算示範手冊說明，於成果報告第四章第二節(P.89)增列建議之解說內容，並說明依循目前我國「建築物耐風設計規範及解說」之外牆被覆物考慮方式，計算公式形式未作大幅改變，仍採用外風壓減內風壓方式計算，其中外風壓係數採用目前外牆被覆物設計風壓係數，內風壓係數則使用本研究成果建議之背風面設計風壓係數。並修正報告之建議事項內容，說明後續修訂工作。
2.可考慮先製作類似指導手冊放入本研究報告中，同時對於所謂多孔性外牆的適用對象作定位，其適用範圍亦應有明確說明。	有關研究中建立的多孔性外牆模型，實際應用限制，適用對象的定位，結合規範建議條文之說明，補充於成果報告第四章第二節(P.89)增列建議之解說內容，就可適用對象先加以說明，再說明依循目前我國「建築物耐風設計規範及解說」之外牆被覆物考慮

	方式，計算公式形式未作大幅改變，仍採用外風壓減內風壓方式計算，其中外風壓係數採用目前外牆被覆物設計風壓係數，內風壓係數則使用本研究結果建議之背風面設計風壓係數。在尚未納入規範條文階段，亦可提供相關設計參考。
--	--

參考書目

1. Andrea Giachetti, 2019, Wind effect on permeable tall building envelops: Issues and Potentialities, CTBUH Journal Issue III, pp.20-27.
2. A. Kareem, J. Zhao, 1994, Engineering Stochastic response analysis of tension leg platform: A statistical quadratization and cubicization approach, J. Engineering, vol.31.
3. D. K. Kwon and A. Kareem, 2011. Peak factors for non-Gaussian load effects revisited, J. Structural Eng. 137(12) 1611–1619. (DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000412)
4. Edmund C.C. Choi , Zhihong Wang , Study on Pressure-Equalization of Curtain Wall Systems , 1998 , Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
5. F. Sadek, E. Simiu, 2002, Peak Non-Gaussian Wind Effects for Database-Assisted Low-Rise Building Design, Journal of Engineering Mechanics-asce, vol.128, Issue 5.
6. Goodwin, I., Holmes, G., Cochrane, R., & Mason, O. (2003). The ability of adult mental health services to meet clients' attachment needs: The development and implementation of the service attachment questionnaire. Psychology and Psychotherapy: Theory, Research and Practice, 76(2), 145–161.
7. H. J. Gerhardt, F. Janser, 1994, Wind loads on permeable facades, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 53, 37-48.
8. J. D. Holmes, W. H. Melbourne, G. R. Walker, 1989, A Commentary on the Australian Standard for Wind Loads AS1170 Part2, Australian Wind Engineering Society, Melbourne.
9. Kwok, KCS, Samali, B, Hu, G, Tse, KT 2014, 'Wind-induced response reduction of a tall building with an innovative façade system', in ST Smith (ed.), 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), vol. II, Byron Bay, NSW, 9-12 December, Southern Cross University, Lismore, NSW, pp. 993-998. ISBN: 9780994152008.

10. Kasperski, M. , 2003, Specification of the design wind load based on wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91,527–541.
11. Mikael Salonvarra , Achilles N. Karagiozis, PhD, Marcin Pazera, William Miller, 2007, Air Cavities Behind Claddings—What Have We Learned?, *ASHRAE, Buildings X*.
12. M. Huang, W. Lou, C. Chan, N. Lin, X. Pan, 2013, Peak Distributions and Peak Factors of Wind-induced Pressure Processes on Tall Buildings, *J. Eng. Mech.*, 139(12), 1744–1756.
13. N. J. Cook, J. R. Mayne, 1980, A Refined Working Approach to the Assessment of Wind Loads for Equivalent Static Design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 6(1–2), 125–137.
14. S. R. Winterstein, T. Kashef, 2000, Moment-based Load and Response Models with Wind Engineering Applications, *J. Sol. Energy Eng., Trans., ASME*, 122(3), 122–128.
15. Simu, E. & R.H. Scanlan, “Wind effect on structures”, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 3rd. edition, 1996.
16. Stathopoulos, T., Surry, D., Davenport, A.G. (1979). “Internal pressure characteristics of low-rise buildings due to wind action”. *Proceedings of the 5th International Wind Engineering Conference* 1, 541-463, Forth Collins, Colorado USA.
17. Yuan-Lung Lo, Yu-Ting Wu, Chung-Lin Fu, Ying-Chang Yu, 2020, Wind load reduction effects on inner buildings by exterior porous façades, *Building and Environment*, 183, 107-148.
18. Y. L. Lo, H. C. Li, 2014, Moment Effects of Parent Distribution on Annual Maximum Wind Speeds, *Journal of Applied Science and Engineering*, 17(4), 391-402.
19. Y. Zhou, T. Kijewski, A. Kareem, 2003, Aerodynamic Loads on Tall Buildings: Interactive Database, *Journal of Structural Engineering*, 129, 3.
20. 樓文娟，李桓，魏開重，陳勇，李煥龍，2008，典型體型高層建築雙層幕牆風壓分布試驗，*哈爾濱工業大學學報*，第四十卷第二期。
21. 張敏，樓文娟，陳勇，2008，舉行建築雙層幕牆的風荷載特徵及

- 陣風係數，浙江大學學報(工學版)，第四十二卷第一期。
22. 「建築物耐風設計規範及解說」，營建雜誌社 編印，內政部建築研究所，2014，台灣。
 23. 建築物耐風設計技術手冊，內政部建研所出版，2017，ISBN 978-986-05-3100-8
 24. 胡維哲，最新建築相關法規實務全集，大樹林出版社，2011，台灣。
 25. 林祺錦，2021，建築物外觀設計關鍵，風和出版社。
 26. 林楨中、顏聰，2016，外牆框式施工架風災分析與風力之探討，勞動部勞動及職業安全衛生研究所成果報告，ILOSH105-S307。
 27. 許正傑、黃斌、陳太農、鄭佳欣、陳兆華，2007，等壓雨屏牆風載之研究，中華民國建築學會「建築學報」第 59 期，63~78 頁，2007.3。
 28. 陳上元，2007，智慧代理者理論應用在可調適性建築環境的研究——以智慧皮層為例，國立成功大學建築研究所博士論文。
 29. 陳兆華，2005，風攻角對雨屏牆等壓性能之研究，國立成功大學建築研究所碩士學位論文。
 30. 陳若華，2021，應用風洞實驗探討建築物多孔隙雙層外牆之設計風載重，行政院科技部鼓勵技專校院從事實務型研究專案計畫成果報告，MOST 108-2637-E-270-001。
 31. 陳若華，2020，建築物外加多孔隙外牆風荷載之風洞實驗研究，第八屆全國風工程研討會，國立台灣科技大學，台北市。羅元隆，林逸崧，2016，低矮建築物屋頂表面極值風壓之特性分布探討，第六屆全國風工程研討會，彰化市，建國科技大學。
 32. 鄭佳欣，2005，雨屏透風孔幾何形狀對雨屏牆等壓性能之研究，國立成功大學建築研究所碩士學位論文。
 33. 鄭元良，鍾光民，鍾政洋，周晉成、蘇皋群，2020，風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究，內政部建築研究所協同研究報告

建築物多孔性外牆之受風作用特性研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：王安強、陳若華、羅元隆、蔡宜中、楊致嘉、郭建源、鍾政洋、陳正瑋

出版年月：111年12月

版次：第1版

ISBN：978-626-7138-32-8（平裝）