

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（一〇九）

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

中華民國109年12月

計畫編號：10915B0011-2

風洞實驗室不同縮尺流場之 地況模擬研究

研 究 主 持 人 ： 鄭元良

協 同 主 持 人 ： 鍾光民

研 究 員 ： 鍾政洋

研 究 助 理 ： 周晉成、蘇皋群

研 究 期 程 ： 中華民國 109 年 3 月至 109 年 12 月

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國109年12月

目次

表次	III
圖次	V
摘要	1
第一章 緒 論	5
第一節 研究緣起與背景	5
第二節 研究內容與方法	6
第二章 理論背景與相關研究	9
第一節 大氣邊界層特性	9
第二節 相關研究	14
第三章 風洞實驗	19
第一節 實驗設施與設備	19
第二節 實驗參數規劃	22
第三節 縮尺地況試驗結果	25
第四節 縮尺地況調整過程	42
第五節 縮尺模型試驗結果	47
第四章 研究成果與討論	57
第一節 研究成果	57
第二節 問題檢討與對策	58
第五章 結論與建議	61
第一節 結論	61

第二節 建議.....	62
參考書目	63
附錄一 採購評選意見與回應.....	65
附錄二 期中審查意見與回應.....	69
附錄三 第一次專家座談會意見與回應	73
附錄四 期末審查意見與回應.....	77
附錄五 第二次專家座談會意見與回應	81
附錄六 各案例之試驗擺設條件	85
附錄七 各案例之量測資料統整表	89

表次

表 2.1 地況與指數	10
表 2.2 不同地況之地表粗糙長度	11
表 3.1 1/250 C 地況之地況參數	27
表 3.2 1/100 C 地況之地況參數	32
表 3.3 1/50 C 地況之地況參數	33
表 3.4 1/250 B 地況之地況參數	36
表 3.5 1/100 B 地況之地況參數	38
表 3.6 1/50 B 地況之地況參數	39
表 3.7 壓力梯度	41
表 3.8 渦流產生器尺寸	43
表 3.9 改變渦流產生器尺寸之參數變化	44
表 3.10 地表粗糙元參數變化	45
表 3.11 實際建物與縮尺模型尺寸	47
表 3.12 50101 平均風壓係數誤差表	52
表 3.13 50501 平均風壓係數誤差表	53
表 3.14 50101 擾動風壓係數誤差表	53
表 3.15 50501 擾動風壓係數誤差表	54
表 3.16 50101 極值風壓係數誤差表	54
表 3.17 50501 極值風壓係數誤差表	55
表 4.1 各縮尺地況量測建議範圍	58

圖次

圖 1.1 研究流程圖	7
圖 2.2 三角形渦流產生器尺寸示意圖	16
圖 3.1 內政部建築研究所環境風洞	20
圖 3.2 熱線測速儀主機與一維熱線探針	21
圖 3.3 三維動態皮托管主機與探針本體	21
圖 3.4 三維移動機構控制主機與本體	22
圖 3.5 建研所原有地表粗糙元素尺寸	22
圖 3.6 地表粗糙元素交錯排列方式 (上視圖)	23
圖 3.7 新製加大之地表粗糙元素尺寸	23
圖 3.8 被動設施擺設示意圖 (側視圖)	24
圖 3.9 風洞地況實際擺設狀況	24
圖 3.10 風速剖面量測位置示意圖 (上視圖)	25
圖 3.11 原有 1/250 C 地況 平均風速剖面	26
圖 3.12 原有 1/250 C 地況 擾動風速剖面	26
圖 3.13 case01 平均風速剖面(wire)	26
圖 3.14 case01 擾動風速剖面(wire)	26
圖 3.15 原有 1/250 C 地況 紊流積分長度尺度剖面	27
圖 3.16 case01 紊流積分長度尺度剖面(wire)	27
圖 3.17 原有 1/250 C 地況 紊流頻譜密度函數	28
圖 3.18 case01 紊流頻譜密度函數 (wire)	28

圖 3.19 case01 平均風速剖面(cobra)	29
圖 3.20 case01 擾動風速剖面(cobra)	29
圖 3.21 case01 紊流積分長度尺度剖面(cobra)	29
圖 3.22 case01 紊流頻譜密度函數(cobra)	30
圖 3.23 case15 平均風速剖面	31
圖 3.24 case15 擾動風速剖面	31
圖 3.25 case15 紊流積分長度尺度剖面	31
圖 3.26 case15 紊流頻譜密度函數	32
圖 3.27 case30 平均風速剖面	33
圖 3.28 case30 擾動風速剖面	33
圖 3.29 case30 紊流積分長度尺度剖面	34
圖 3.30 case30 紊流頻譜密度函數	34
圖 3.31 原有 1/250 B 地況 平均風速剖面	35
圖 3.32 原有 1/250 B 地況 擾動風速剖面	35
圖 3.33 case41 平均風速剖面	35
圖 3.34 case41 擾動風速剖面	35
圖 3.35 case41 紊流積分長度尺度剖面	36
圖 3.36 case41 紊流頻譜密度函數	36
圖 3.37 case45 平均風速剖面	37
圖 3.38 case45 擾動風速剖面	37
圖 3.39 case45 紊流積分長度尺度剖面	37
圖 3.40 case41 紊流頻譜密度函數	38

圖 3.41 case48 平均風速剖面	39
圖 3.42 case48 擾動風速剖面	39
圖 3.43 case48 紊流積分長度尺度剖面	39
圖 3.44 case48 紊流頻譜密度函數	40
圖 3.45 壓力梯度量測示意圖	41
圖 3.46 壓力梯度量測試驗架設	41
圖 3.47 SP、SPD 與 α 值之變化關係	42
圖 3.48 SP、SPD 與紊流強度之變化關係	43
圖 3.49 風速剖面與渦流產生器尺寸之變化關係	44
圖 3.50 混和地表粗糙元排列方式	45
圖 3.51 風速剖面與地表粗糙元尺寸與排列方式之變化 關係	46
圖 3.52 TTU 量測建築外觀	47
圖 3.53 TTU 量測建築尺寸與點位	47
圖 3.54 模型架設示意圖	48
圖 3.55 1/250 C 地況 1/100 模型	49
圖 3.56 1/50 C 地況 1/100 模型	49
圖 3.57 1/250 C 地況 1/50 模型	49
圖 3.58 1/50 C 地況 1/50 模型	49
圖 3.59 1/250 C 地況 1/25 模型	49
圖 3.60 1/50 C 地況 1/25 模型	49
圖 3.61 50101 平均壓力分佈圖	50

圖 3.62 50501 平均壓力分佈圖	50
圖 3.63 50101 擾動壓力分佈圖	51
圖 3.64 50501 擾動壓力分佈圖	51
圖 3.65 50101 極值壓力分佈圖	51
圖 3.66 50501 極值壓力分佈圖	51

摘要

關鍵詞：大氣邊界層、縮尺效應、風洞實驗

一、研究緣起

風洞實驗對於大型結構物或高層建築物之抗風能力與動態反應評估相當重要，其可於建築物建造前先進行縮尺模型試驗，並由試驗結果預先了解建築物潛在之危機。而近年來由於人口往都市集中造成地狹人稠之狀況，於建築面積有限之狀況下，只有於法規內盡量將建築樓層增高以求居住最大效益，於建築技術提升之現代，建築物往高層發展是必然之趨勢。而除了高層建物外，另一方面，較小尺度之附屬構造、標示物或延伸至屋頂型太陽能板等，其尺寸相對較小，若欲探討其受風力之效應，則其縮尺比例必然較小於高層建築物之縮尺，因此，建構相應比例之大氣紊流邊界層流場則為風洞試驗規劃前之首要步驟。

建研所風洞實驗室建立之現有流場條件為 A、B 與 C 三種大氣邊界層流場地況，其縮尺為 1/250，由於近年來試驗與檢測案尺寸之多樣性，縮尺比例有擴充之必要。本案將依據文獻建議之方式，計算出渦流產生器尺寸並製作，配合地表粗造元之排列方式，模擬各設定之縮尺比例風場，檢視比對平均流速、紊流強度、紊流長度尺度剖面與風速頻譜特性，以供後續應用使用。

二、研究方法及過程

研究將包含以下內容：

1. 蒐集包含 AIJ-RLB、ESDU 風工程系列或其他有關大氣邊界層之來流文獻，探討並建立適用之風場模擬依據。
2. 本研究將選定建研所風洞實驗室常用以及未來規劃之縮尺比例，參考前述之風場模擬依據，透過渦流產生器與地表粗糙元之不同組合，建立相應縮尺比例之大氣邊界層流場。

3. 選定一建築物或結構物模型，進行風洞試驗量測，討論不同縮尺流場特性對其之影響。

三、重要發現

- 一、由試驗結果可知，文獻建議之渦流產生器經驗公式，於 6 倍高度後可得相近設計之風速剖面等資料，但仍需進行量測微調，並檢視風速剖面橫向均勻狀況，視量測結果調整渦流產生器之間距與距離。上半部剖面指數可依渦流產生器經驗公式計算，但近地處之風速剖面冪次與地表粗糙元素較相關，試驗應依量測結果調整其排列與改變尺寸，以產生符合設定之剖面，調整原則若需增加底部紊流強度與增加風速虧損，基本上以加密與加大尺寸進行，排列密度與尺寸可依文獻建議公式試算後再行量測調整。
- 二、紊流強度最大值基本上由地表粗糙元素尺寸與排列控制，但於垂直向之紊流強度分佈可藉由加大渦流產生器尺度略為提升。風速頻譜基本上各剖面除近地表面 10 cm 範圍左右後皆近似於 von Karman spectrum 分佈。
- 三、積分尺度剖面，試驗量測值約略介於渦流產生器尺寸之 2 至 3 倍左右，於實驗室中無法完全按照設定比例放大，以現有之實驗設備無法達成 1/100 與 1/50 縮尺之理論縮尺值，後續則不特別調整此參數，但仍將量測結果列於報告內供後續參考。因此，在使用各小縮尺流場時需考量積分尺度可能造成之影響，而文獻(Simiu & Yeo 2019 與 ASCE 49-12)內提及當積分尺度若明顯大於建築特徵長度時，其表面壓力分佈較受流場內小尺度渦流影響，可放寬此模擬條件，在實際應用上，若縮尺建築模型之特徵長度小於紊流長度尺度之 1/3 內時則可使用。
- 四、由不同縮尺地況配合不同縮尺建築物之風洞試驗結果發現，採用比例不正確之模型可能會放大誤差，尤以大縮尺流場配合小縮尺模型(如 1/250 流場與 1/25 模型)最為嚴重，由於其紊流強度分布差異較大，造成壓力擾動偏低進而產生較低之壓力極值，即於實際應用上，可能低估表面最大

風壓，因此應盡量採用合乎縮尺比例之來流地況與模型進行試驗。但若無法採用合宜之流場或模型縮尺，則應盡量使平均風速剖面與紊流強度分布符合實際狀況設定，可得相對接近實際狀況之結果。

四、主要建議事項

根據研究發現，本研究針對風洞實驗室不同縮尺風場之研究，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議、及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：財團法人台灣建築中心

由試驗結果可提供配合不同尺度之建築物或結構物之風場條件，若需取縮尺模型進行風洞試驗評估時，需謹慎考量風場縮尺問題，包含平均、紊流剖面，以及長度尺度可能造成之效應，建議可由研究成果或其相關文獻建立示範例，以供未來研究或風洞試驗檢測參考使用。

長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：成功大學航太中心風洞實驗室

為保持實驗室風場品質水準，建議定期進行縮尺風場條件檢視，檢視各縮尺流場剖面資訊是否產生變化，或仍有可增進精度之方法進行量測，持續建立實驗室風場條件，除可提供風洞試驗研究優良品質風況外，在相關風洞試驗業務亦可提供多元化之試驗條件，持續保持競爭力。另亦可增加地表粗糙元素之尺寸，可提供更完善之地表粗糙度，將有益於未來剖面微調，使風速剖面製作更有彈性。

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

一、研究背景

在評估建築物或結構物受風力作用下之表面壓力分佈、載重與動態反應時，一般可採取理論計算、數值模擬與實驗方式等三種方式進行。其中理論推導計算由於參與因素眾多且複雜，要應用於精確計算僅限於特殊狀況下，實務應用較常適用於簡單外型或需快速粗略估算之情況，且通常會偏於保守估計。而在數值模擬部分則須選用適當數值模型，配合建造合適之網格系統，並須率定數值模式之正確性後才可進行模擬使用。然其計算耗時與其網格細緻度、採用之紊流模式及流場條件等直接相關，若非簡易外型，常須使用大量計算資源才可於預期時限內完成。因此在已有風洞設備之情況下，直接製作縮尺模型進行風洞試驗量測為最常見且可直接獲得受風資訊之方式。但採風洞試驗進行量測時亦須滿足各種條件，首先試驗縮尺相似性須滿足幾何相似、動力相似與運動相似，以確保縮尺試驗之結果可經理論推算至實場狀況。再者，試驗規劃之模型設計與製作須滿足相似縮尺要求，並於相應縮尺設定之流場條件下進行測試。若試驗欲模擬之結構位於大氣邊界層流場內，由於紊流邊界層內之渦流結構尺寸與地況相關，具有一定尺寸與比例，因此若僅考慮指數律平均剖面將無法正確反應出該地況之紊流強度分布與其特徵長度尺度，並對結構物之風壓與風載量測產生誤差，即若要在不同縮尺之大氣邊界層流場下進行試驗，則應盡量建立相對應縮尺之地況。

二、研究目的

內政部建築研究所風洞實驗室擁有國內最大型之風洞實驗設備，其用途可涵蓋氣動力試驗、汙染擴散試驗行人風場量測、建築結構風壓與風載量測、氣彈力建築與氣彈力橋樑試驗等，於大氣邊界層流場條件，目前已建立 A、

B 與 C 地況於 1/250 縮尺之地況擺設，若欲進行其他縮尺比例試驗，則需擴充實驗室之地況擺設條件。由於各風洞之幾何外型、尺寸、設計曲線等不同，現今僅有建議之概略形式，並無一體適用之方式，本研究將依相關文獻建議方式，經重複量測與適當調整後，建議出內政部建築研究所風洞實驗室適用之相關地況參數，並供未來調整地況參考。

第二節 研究內容與方法

建立與調整風場地況在各實驗室皆為建立初期必進行之過程，原因顯而易見，若在不當縮尺或不正確之風場條件下進行試驗，將得到非預期之結果。文獻所提及之方法於數十年內並無太大變化，原因亦在於各實驗室尺寸不一、斷面形式不同與風洞內之平整度等因素都將導致經驗公式略為改變，於前人文獻中亦提及需依據量測後之結果進行調整，而調整方式多採以試誤法進行。若可於此研究中建立出建研所風洞實驗室之經驗式，於未來將可參考此經驗進行調整，因此本研究亦先採用文獻所建議之方式進行，本案所進行之風場調整過程與試驗結果將可作為風洞實驗室之風場調整參考。

由於縮尺比例較小時，於風洞內將無法完整模擬設定邊界層之全貌，因此本案目標將設定於部分邊界層模擬。使用較小縮尺比例一般代表目標物之尺寸較小，進行試驗需要製作較大尺寸模型，在考量進行風洞試驗時，阻塞比(blockage ratio)小於 5%之條件下，模型最大投影面積約在 0.5 m^2 左右，在上述狀況下，研究設定至少在風洞半高內之風速剖面須滿足要求。另本研究於調整地況將涉及大量實驗時間，而風洞之使用時段有限，本研究將盡量於每月進行一周實驗與數據分析，分散實驗時間以避免影響風洞實驗室其餘研究案與業務進行。

研究擬採文獻建議之三角渦流產生器與地面粗糙元組成地況產生元件，必要時再加上阻牆以降低近地風速與增加紊流強度。三角渦流產生器以 Irwin 建議之剖面指數計算，地表粗糙元之幾何尺寸與密度將參考相關文獻 (Wooding 等人、Counihan & Jia) 提出之建議進行調整。本案除檢視原本風洞

實驗室現有之 1/250 比例外，預計額外建立兩組縮尺比例較大之地況，如 1/100 或 1/50 縮尺，以供未來相關研究使用。所建立之風速剖面資料包含：(1) 平均風速剖面；(2) 紊流強度剖面；(3) 積分長度剖面；(4) 風頻譜等四種基本資料。除了風速剖面建立外，本案亦將選取一標準模型，藉由比對兩不同比例地況條件下量測之壓力分佈，檢視不同縮尺風場之結果。

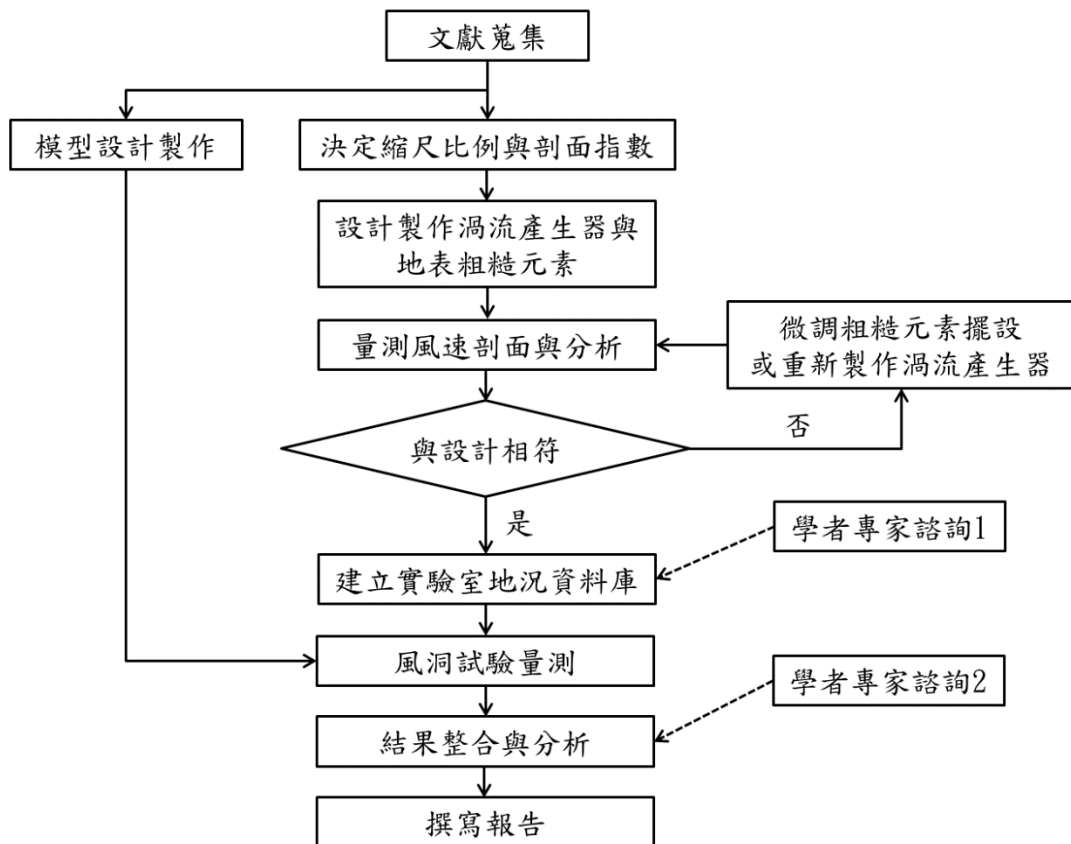


圖 1.1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 理論背景與相關研究

第一節 大氣邊界層特性

近地表之氣流移動基本上由大尺度氣壓驅動，在流動狀態下，空氣流經長距離受到地表面之地形、植被、構造物之摩擦力與阻力影響，產生垂直分佈之風速剖面，此風速剖面之特性主要與地表粗糙度相關。該剖面越近地表則速度越低，而風速隨高上升而增加，直至脫離地表影響範圍，此處高度稱為邊界層厚度，對應之風速則稱為層緣風速或梯度風速(*gradient velocity*)，而此剖面之影響範圍則稱為大氣邊界層(參見圖 0.1)。

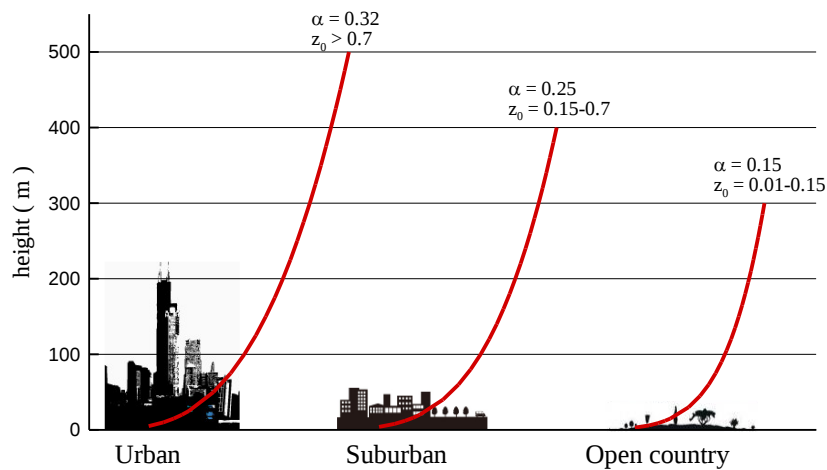


圖 2.1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖

(資料來源：本研究繪製)

人類之相關活動與工程建設基本上皆在大氣邊界層範圍內進行，除超高層建築外，風工程之研究課題基本上皆落於大氣邊界層內，因此若欲進行風洞試驗研究，於實驗室環境正確模擬來流風場特性為首要之步驟。後續將對大氣邊界層之各項特性分述說明。

1. 平均風速剖面

大氣邊界層水平方向之平均風速剖面隨高度增加而遞增，而增加的幅度

與地況種類有關，一般於邊界層水平方向之平均風速剖面(mean velocity profile)可以指數律與對數律兩方式來描述。指數律較適用於高風速和距地面 0.1δ (δ 表邊界層高度) 以上之邊界層平均風速，故探討距地表面較高處的邊界層上半部，平均風速剖面使用指數律剖面較為適當。另一般認為大氣紊流邊界層下方 20 m 尺範圍內，對數律之結果較優於指數律之結果，而在 20 至 100 m 間，兩種方式皆可對中性大氣邊界層之平均風速做出合理預測。

指數律(power law profile)之風速剖面：

$$\frac{U(z)}{U_{\delta}} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2-1)$$

其中 $U(z)$ 為高程為 z 之平均風速、 U_{δ} 為層緣外的自由流速、 δ 為邊界層厚度、 α 為冪指數。邊界層的高度與指數視地表而定，表 2-1 為建築物耐風設計規範與解說對於不同地況與指數的關係。

表 2.1 地況與指數

地況分類	地況特性	指數 α 值	δ (m)
地況 A	城市市中心	0.32	500
地況 B	郊區	0.25	400
地況 C	開闊平原	0.15	300

(資料來源：建築物耐風設計規範與解說)

對數剖面(logarithmic profile)之風速剖面：

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2-2)$$

其中 $U(z)$ 為高程為 z 之平均風速、 κ ($=0.4 \sim 0.41$) 為 von Karman 常數、 z_0 為地表粗糙長度、 u_* 為摩擦速度，其定義為

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2-3)$$

其中 τ_0 為地表面剪應力(shear stress)、 ρ 為空氣密度。

不同地況的地表粗糙長度如下

表 2.2 不同地況之地表粗糙長度 (單位：m)

地況分類	地表粗糙長度 z_0 (典型值)
地況 A	> 0.7 (2)
地況 B	$0.15 \sim 0.7$ (0.3)
地況 C	$0.01 \sim 0.15$ (0.02)

(資料來源：ASCE 7-16)

2. 紊流強度剖面

大氣邊界層一般皆為紊流流況，由於受地表糙度影響，越近地表面之氣流越為紊亂、速度擾動大。紊流為三維結構，其擾動風速為三方向分量之組成(縱向、側向及垂直向)，但縱向速度擾動對結構影響大於其他方向且最為重要。主流向紊流強度(longitudinal turbulence intensity)， I_u 定義為在某一高程 z 量測主流向風速擾動速度 $u(z)$ 之均方根值 $\sqrt{u(z)^2}$ 與同一位置量測之主流向平均風速 $U(z)$ 之比值，亦即

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{u(z)^2}}{U(z)} \quad (2-4)$$

同樣的，側向紊流強度 I_v 與垂直向紊流強度 I_w 分別定義為：

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{v(z)^2}}{U(z)} \quad (2-5)$$

$$I_w(z) = \frac{\sqrt{w(z)^2}}{U(z)} \quad (2-6)$$

其中 $v(z)$ 與 $w(z)$ 分別為在某一高度 z 測量之側向及垂直向風速擾動值，紊流強度為了解紊流場擾動性風速之重要指標，紊流強度一般與地表糙度與

高程相關(ASCE 49-12)，約略可以下式表示：

$$I_i(z) = A_i / \ln(z/z_0) \quad (2-7)$$

其中 $A_i = 1.0、0.8、0.5$ ，分別對應於 $i = u、v、w$ 。

3. 紊流積分尺度

流場中的擾動可視為由流場內大小尺度不一之渦旋(eddy)所造成，為了解其特性，經由針對擾動流場做時間相關性分析，採用泰勒凍結紊流假說(Taylor's frozen turbulence hypothesis)觀念對時間積分，所得之積分尺度可視為渦流紊流的平均特性，包含長度尺度與時間尺度，其中積分長度尺度(integral length scale)可視為渦流的平均大小尺寸，而積分時間尺度(integral time scale)為平均尺寸渦流旋轉一圈所需要的時間。

流場中任意點之速度尤拉自相關係數(Eulerian time autocorrelation coefficient)可由下式計算之：

$$R(\tau) = \frac{\sum \overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \sqrt{\overline{u'^2}}} \quad (2-8)$$

其中 τ 為時間稽延(time lag)、 $u'(t)$ 為瞬時擾動速度、 $\sqrt{\overline{u'^2}}$ 為擾動風速的均方根值、 $\overline{u'(t)u'(t+\tau)}$ 為相距 τ 之兩擾動風速平均值

$$T_e = \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (2-9)$$

(2-9)式中 T_e 為尤拉積分時間尺度，可視為紊流擾動速度自相關性最長時間，若超出此時間範圍，則其相關性快速衰減。當 $U \gg u'$ 時流場中某定點速度擾動可假想成是由於整個流場流過該點，即凍結流場的觀念，因此均勻紊流場中渦旋的平均大小可由下式表之：

$$L_x = U \times T_e \quad (2-10)$$

L_x 即為紊流長度尺度，亦是為識別流場特性上一重要參數。紊流積分長

度尺度基本上可視為紊流之渦流的平均尺寸。若採用卡式座標(主流向 x 、側向 y 、垂直向 z)，及考慮三方向的紊流速度(主流向 u 、側向 v 、垂直向 w)，則紊流尺度包含九個分量， L_x^u 、 L_y^u 、 L_z^u 、 L_x^v 、 L_y^v 、 L_z^v 、 L_x^w 、 L_y^w 、 L_z^w ，但一般研究與建築應用上仍以 L_x^u 為主要指標。

4. 紊流頻譜

紊流可視為不同尺度的渦流所組成的，可由頻率的高低可表達各種尺度，理論上可把紊流的能量依頻率的不同，區分成頻譜(power spectrum)來加以描述其特性，通常可分為三個部分：

低頻部分的含能渦流區(energy containing eddies)。

中頻部分的慣性次階區(inertial subrange)。

高頻部分的黏滯消能區(viscous dissipation)。

紊流的能量傳遞，是由低頻部分的大尺度渦流，傳遞向中頻部分的慣性次階，再傳向高頻部分的消能區，提供邊界處黏滯摩擦效應所需的能量損耗。

根據 Kolomogrove (1941)的理論與假設，有關於紊流能譜分析可推導出下式：

$$S(n) \sim \varepsilon \times n^{-5/3} \quad (2-11)$$

其中 $S(n)$ 為能譜密度(power spectrum density)、 ε 為紊流能量消散率(energy dissipation)、 n 為紊流渦流頻率(frequency)。如今在描述風能頻譜分佈時廣泛以 von Karman spectrum 形式表示：

$$\frac{n^x S_u(z, n)}{\sigma_u^2} = \frac{4F}{[1 + 70.8F^2]^{5/6}} \quad (2-12)$$

其中 $\frac{n^x S_u(z, n)}{\sigma_u^2}$ 為無因次化頻譜密度函數(non-dimensional power spectrum density function)， F 為無因次化頻率(以積分尺度與平均風速進行計

算)。在非近地表處與開放區域，將風速訊號轉換為頻譜密度函數應可得與 2-12 式相近之分佈結果。

第二節 相關研究

在風洞中所模擬之流場通常要求需與實際流場相似且為中性穩定邊界層流，而模擬流況相似部分，平均風速相似可用指數律或對數律模擬；紊流流況相似則要求流場的紊流強度、雷諾應力及紊流能譜密度與實際流場相似。

於風洞中模擬大氣邊界層流場之目的是在最短距離內建立出目標邊界層流場並維持平衡狀態，早期常見作法是在風洞內鋪設地表粗糙元素(roughness element)，讓邊界層自然加厚生成，但採此方法之邊界層厚度與試驗段長度直接相關，需要相當之距離才能得到足夠厚度之邊界層流場。為了快速強制邊界層增長，可在風洞試驗段入口處加裝設施來加速邊界層的發展，一般可分為主動設施與被動設施兩方式。主動設施包含方向性射流裝置、控制可動擋板或以複數風扇控制入流剖面；而被動設施包含格柵(grid)、渦流產生器(vortex generator)、地面阻牆(barrier)、龍齒板等來輔助產生紊流邊界層與其相應特性。

目前進行風洞試驗時，由於尺寸限制，多數實驗室皆採取在試驗段入口處設置被動設施來產生所需的邊界層流，再配合鋪設適當的粗糙元素與足夠長度的試驗段，可發展出穩定、平衡的邊界層流，其並具有相應之平均風速剖面和紊流特性。

國外在 1950-1960 年代早期研究已發現，若未在風洞內正確模擬大氣邊界層之特性，則將導致根本上的錯誤結果。由於大氣邊界層基本上皆為紊流流場，其紊流特性與邊界層自身性質高度相關，若要進行正確測試，測試件尺寸與來流剖面之比例則相當重要。Jensen (1958)最先提出模型尺寸與大氣邊界層尺寸比例之重要性，其證明只有在地況粗糙度 z_0 等比例之條件下，模型與實際尺寸建築之壓力係數與受力係數才會接近相等。在此之後，有關於風洞內模擬大氣邊界層之研究眾多，Davenport (1967)建立長尺寸邊界層風洞

以模擬邊界層來流，並應用於模型壓力、受力與振動量測等，早期做法是在長風洞內地表擺設大量不同尺寸之粗糙塊以模擬地面糙度，經長距離後由地表造成之剪力自然產生風速剖面。採此方法可產生匹配之風速剖面特性，但所需之風洞長度過長且須擺設大量地表粗糙元素，為求經濟性與簡化試驗流程，後續開始有學者研究如何降低風洞試驗段長度，且可同時達到邊界層剖面特性需求，如 Armitt 與 Counihan (1968)提出之三角楔型、Counihan (1969)提出之 1/4 橢圓線型與 Standen (1972)提出之近三角形渦流產生器，皆為放置於風洞上游並提供阻力產生初始剖面外型。但只靠渦流產生器並無法製造出所需之紊流特性，因此常搭配如地面阻牆、龍齒檔板以及地表粗糙元素裝置調整，阻牆與龍齒檔板可較明顯降低近地區域之風速剖面與增加紊流強度，而地表粗糙元素可持續維持地面提供之剪應力。Wooding 等人(1973)對於地表粗糙元素進行一系列之探討，整理了前人研究資料，將粗糙元素之形狀、排列密度與排列方式為變數，與風速以對數律形式給出回歸之係數。Counihan (1971)則探討了地表粗糙元擺設之密度與其鋪設範圍與 z_0 變化之關係式。Jia 等人(1998)探討了立方體地表粗糙元之尺寸、 z_0 與擺設密度之關係，透過實驗方式進行比對驗證並建立預測方程式。Irwin (1981)對三角形渦流產生器做進一步研究，並建議出指數率剖面與三角板尺寸之關係式。Counihan (1973)、Peterka 與 Cermak (1974)與 Cook (1978)等皆已成功應用上述方式建立出適當比例之風速剖面。

本案參考上述文獻，將以製作渦流產生器(圖 2.2)產生初始剖面條件為主，並配合地表粗糙元素提升地表糙度產生並維持近地面之紊流強度。若假定渦流產生器之上風場為均勻流，渦流產生器下風處所形成的邊界層厚度為 δ 、剖面指數為 α ，Irwin (1981)利用邊界層裡之動量通量虧損及試驗段壓力梯度與渦流產生器的阻力(包括阻塞效應)及粗糙元之阻力平衡原理，經實驗分析後回歸出下列兩個經驗公式：

$$h = \frac{1.39\delta}{1 + 0.5\alpha} \quad (2-14)$$

$$\frac{b}{h} = \frac{H}{2\delta} \frac{\psi}{(1+\psi)} (1+0.5\alpha) \quad (2-15)$$

其中 H 為風洞試驗段高度、 b 為渦流產生器底寬、 h 為渦流產生器高度。
 ψ 與 β 兩係數分別為：

$$\psi = \frac{\beta}{(1-\beta)^2} \frac{2}{(1+2\alpha)} + \beta - \frac{1.13\alpha}{(1+\alpha)(1+0.5\alpha)}$$

$$\beta = \frac{\delta}{H} \frac{\alpha}{(1+\alpha)}$$

以此公式設計之渦流產生器間距為 $h/2$ ，原則上風洞的寬度應為 $h/2$ 的倍數，但其研究指出並無強制限制，由渦流產生器形成之邊界層在下游約 $6h$ 處後混合約達均勻，形成橫風向均勻流場。

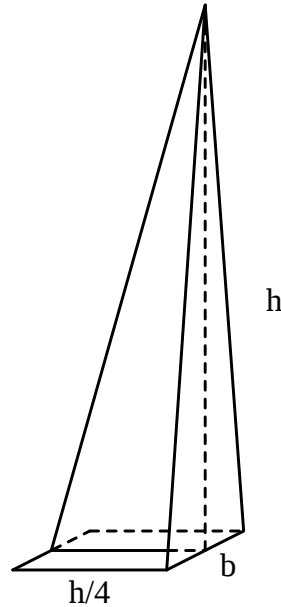


圖 2.2 三角形渦流產生器尺寸示意圖

(資料來源：本研究繪製)

而在地面阻力部分，風洞底板粗糙元之單位面積阻力為 $0.5\rho U_0^2 C_f$ ， C_f 為表面摩擦係數， ρ 為空氣密度。Gartshore 等人(1977)建議：

$$C_f = 0.136 \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \quad (2-16)$$

粗糙元素高度 k_s 及粗糙元素間距 D 可由 Wooding 等人(1973)結果估算

$$\frac{k_s}{\delta} = \exp \left[0.67 \ln \left(\frac{D}{\delta} \right) - 0.1161 \left(2.05 + \frac{2}{C_f} \right)^{1/2} \right] \quad (2-17)$$

上式在 $30 < \delta D^2 / k_s^3 < 2000$ 範圍內有效。

若風速剖面採用對數分佈，用於估算模擬邊界層的粗糙長度，Counihan (1971)之經驗式建議：

$$\frac{z_0}{k_s} \cong 8.2 \left(\frac{k_s}{L} \right) + 1.08 \left(\frac{A_e}{A} \right) - 0.08 \quad (2-18)$$

其中 L 為風洞之吹程、 A_e 為粗糙元素所佔地板之面積、 A 為風洞地板總面積。

粗糙長度若採 Jia 等人(1998)之建議方式評估則為：

$$\frac{z_0}{k_s} = \frac{1 - (d/k_s)}{e^p} \quad (2-19)$$

$$\text{其中 } p = \frac{2k^2}{(A_{\text{eff}}/A_f)(A_f/s)C_d} + 1 - \frac{z_0/k_s}{1 - d/k_s}$$

其中 A_f 為粗糙元素之迎風面積、 A_{eff} 為粗糙元素之迎風有效面積， s 為單一粗糙元素之地面分配面積。

第三章 風洞實驗

第一節 實驗設施與設備

本研究主要目標在於更新內政部建築研究所環境風洞之地況條件，目前所有規劃之風洞試驗皆於該風洞進行量測，透過更改上游之渦流產生器與地表粗糙元素，於下流試驗段處量測風速剖面資訊。試驗初期先以一維熱線探針(hot-wire probe)進行量測，因其反應時間可達 5 kHz 以上，試驗先將取樣頻率訂於 1024 Hz，以了解風速頻譜於高頻能量遞減是否符合文獻理論推導斜率。熱線探針雖可量得較高頻且精度高之風速，但由於其量測原理因素，探針本身對溫度敏感度相當高，於風洞量測時若與溫度變化較大時會得到相對大的誤差。因此，若確認流場特性於高頻符合理論結果，後續試驗則採三維動態皮托管進行風速量測，其優點為可同時量測三分量風速，與熱線探針相比較，其對溫度敏感度較低，惟其反應時間較長，量測頻率上限為 256 Hz，但若確定高頻衰減符合理論，則此量測頻率已可解析風場特性。以下對風洞本體與使用之儀器設備做簡單介紹。

1. 內政部建築研究所環境風洞

內政部建築研究所環境風洞本體為一垂直式的封閉迴路系統，總長度為 77.9 m，最大寬度為 9.12 m，最大高度為 15.9 m。風洞設施為一封閉式的循環風洞，具有兩測試區（第一測試區 4 m× 2.6 m× 36.5 m、第二測試區 6 m× 2.6 m× 21 m），另顧慮到未來如進行污染擴散試驗或煙霧視流試驗可能對風洞本體及工作氣體造成污染，原封閉迴路風洞可透過開啟二樓彎折處切換為開放形式。風洞本體具有兩個測試區段，第一測試區中配置有 2 個旋轉盤，第一座旋轉盤直徑 1 m，安置於距測試區入口處 3 m 處，從事一般流體力學研究；第二座旋轉盤直徑 2.6 m 至 3 m，置於可移動式軌道上，定位於距測試區入口端約 25.5 m 處，並以機械控制使其做旋轉及上下運動，將以建築物受風力作用的空氣動力學研究及污染擴散試驗為主。第二測試區則配置一座旋轉盤，

其距離風洞本體整流段出口 15 m 處，轉盤直徑為 2.6 m，主要用途以橋梁測試為主。風扇型式為直接傳動軸流式風扇，直徑 4.75 m，整體長度包含風扇中心體、驅動馬達及尾錐，約 7.62 m。驅動馬達的最大馬力為 500 kW，最高轉速為 390 rpm。風扇主要功能係提供氣流起始動能，並補充氣流在風洞迴流中流動所產生之壓力損失。馬達控制藉由三相 3300 伏特變頻器來操控風扇驅動馬達的轉數以進行風速調整。風洞可提供最大風速為 30 m/s。試驗模型可設置於試驗段旋轉台的中央，可用數控旋轉台旋轉模型，模擬不同風向角的效果。風洞中邊界層流場之模擬方式為在試驗段上游區域擺設錐形渦流產生器(spire)以及地表粗糙元素(roughness element)，透過不同尺寸錐形渦流產生器與不同密度粗糙元表現在不同條件地況之邊界層流場。

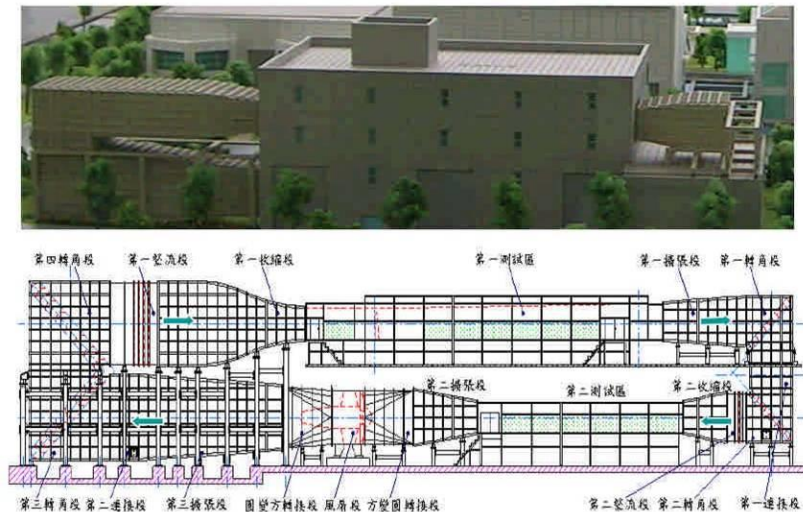


圖 3.1 內政部建築研究所環境風洞

(資料來源：本研究整理)

2. 熱線測速儀

本案使用 DENTEC 熱線測速儀系統(圖 3.2)量測流場速度歷時與紊流強度，首先將 55P11 single wire 安裝至三維移動機構，連接至 Streamline CTA 訊號放大器再連結至電腦。將熱線移動至地況模型前方量測流場風速與紊流強度，量測點為離地 10 mm 位置開始向上量測至邊界層緣，量測點之間隔由近地面 10 mm 至近層緣處 100 mm。量測時之取樣頻率為 1024 Hz，採樣時段為 128 秒，總取樣數為 131072。



圖 3.2 熱線測速儀主機與一維熱線探針

(資料來源：本研究拍攝)

3. 三維動態皮托管

確認風速高頻區之能量衰減狀況後，後續試驗量測斷面風速係採用三維動態皮托管(TFI Cobra probe Series 100，參見圖 3.3)。Cobra 探針具有 3 個壓力孔，可以量測 3 個自由度的風速，其最高動態反應頻率為 256 Hz，速度量測範圍為 2m/s 至 100m/s。基於壓力孔設計之限制，量測結果之有效性限於來流方向 $\pm 45^\circ$ 的範圍內。本風速量測之採樣頻率為 256 Hz，採樣時段為 128 秒。



圖 3.3 三維動態皮托管主機與探針本體

(資料來源：本研究拍攝)

4. 三維移動機構

在量測風速剖面時，熱線探針與 Cobra 探針皆固定於風洞實驗室之三維移動機構上(參見圖 3.4)，此移動機構透過五組步進馬達控制，可經由電腦控

制探針之前後向(x)、水平向(y)與垂直向(z)之位置。

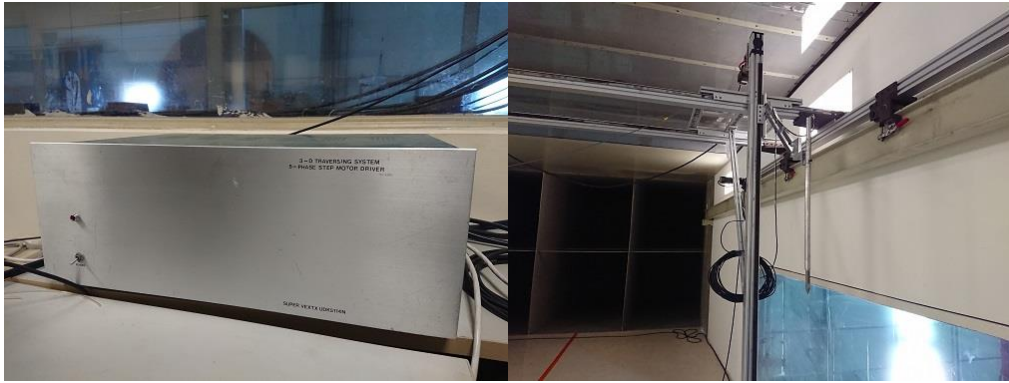


圖 3.4 三維移動機構控制主機與本體

(資料來源：本研究拍攝)

第二節 實驗參數規劃

本計畫研究重點在建立不同縮尺之邊界層來流地況，主要擺設由三角形之渦流產生器(spire)與地表粗糙元素(roughness)組成。渦流產生器之正面正對流場，在後方中線連接檔板降低阻力與提升勁度，尺寸參數如圖 2.2 所示，研究中將計算不同地況剖面所需之渦流產生器，原則上各渦流產生器之間距為 $h/2$ ，但試驗中可能會依據試驗結果進行微調測試。地表粗糙元素則以建研所現有之金屬鐵塊為主(圖 3.5)，排列方式依文獻建議採交錯排列可得較佳之混合流場結果(圖 3.6)，各粗糙元素之間距設定相同為 D ，採均勻排列，單一粗糙元之對應面積為 S 。

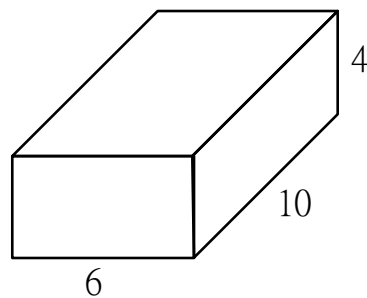


圖 3.5 建研所原有地表粗糙元素尺寸(單位：cm)

(資料來源：本研究繪製)

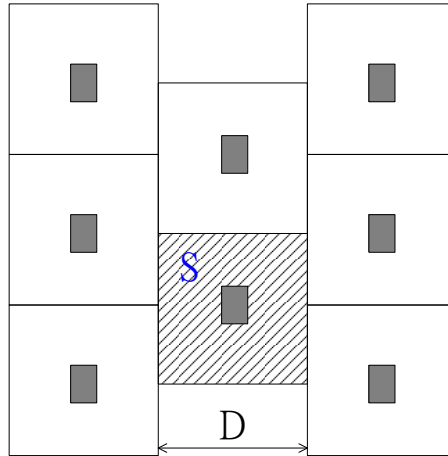


圖 3.6 地表粗糙元素交錯排列方式 (上視圖)

(資料來源：本研究繪製)

另在研究過程中發現，小縮尺之 B 地況剖面若僅採以現有粗糙元素，則地表阻力不足，其所造成之速度虧損偏低無法符合需求曲線，因此另採加大尺寸之木板製粗糙元素提高地面造成之阻力效應，其幾何形狀如圖 3.7 所示。

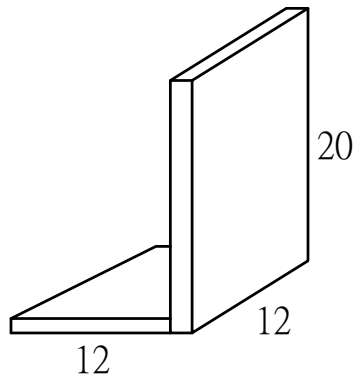


圖 3.7 新製加大之地表粗糙元素尺寸(單位：cm)

(資料來源：本研究繪製)

圖 3.8 為風洞內擺設示意圖，地況量測區以測試圓盤中心為原點，向上游 1.6 m 處開始擺設地表粗糙元素，擺設區域長度以 RR 表示，渦流產生器之位置以 SP 表示，此長度至少大於 6 倍自身高度。為了進一步降低地表處風速，試驗在粗糙元素最後段 1.6 m 區域處鋪設針毯增加糙度，在近地表區可得較佳之平均風速剖面，如圖 3.9 為完整試驗擺設狀況。

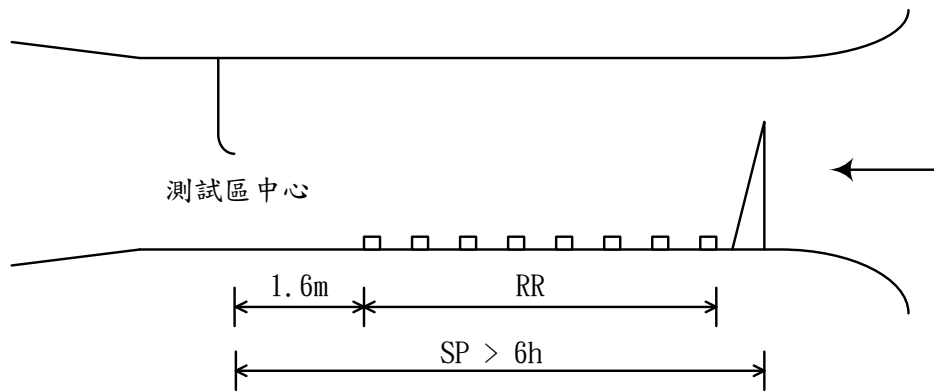


圖 3.8 被動設施擺設示意圖 (側視圖)

(資料來源：本研究繪製)



圖 3.9 風洞地況實際擺設狀況

(資料來源：本研究拍攝)

量測位置中心訂於測試圓盤中心，垂直剖面量測由地表處 1 cm 起始，增視邊界層厚度往上漸至 175 或 195 cm(移動機構高度限制)。除中心點外，試驗亦需量測橫向與前後方位置之均勻性，量測位置如圖 3.10 所示，各渦流產

生器保持均勻分布，其距離固定為 SPD。原則上風速剖面量測將先進行中心位置、兩渦流產生器之間與第二支渦流產生器位置三處，即為 A、B 與 C 三處，D 位置僅於 5 支渦流產生器數量以上才進行，而前後 AB 與 AF 兩處則於約略確認該風速剖面適用後再進行量測。若渦流產生器數量為雙數，則 A、B 與 C 分別改代表為中心位置、距中心最近之渦流產生器與兩渦流產生器間之位置。

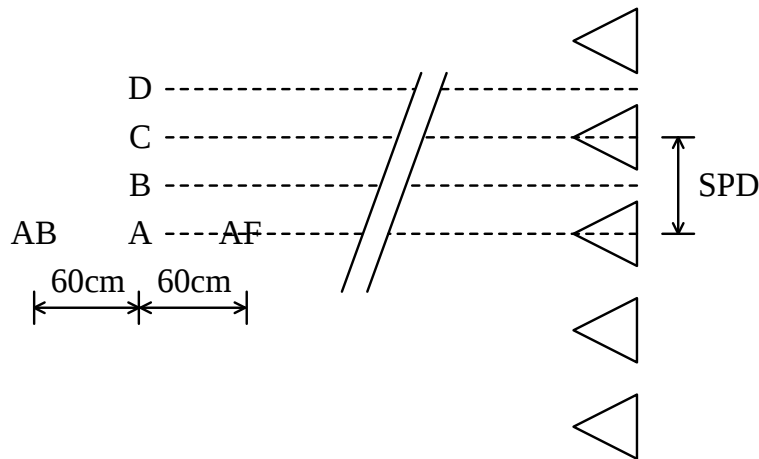


圖 3.10 風速剖面量測位置示意圖 (上視圖)

(資料來源：本研究繪製)

第三節 縮尺地況試驗結果

1. 1/250 縮尺 C 地況

試驗先由實驗室原始設定之 1/250 C 地況進行風速剖面量測，地況擺設條件參見表 3.1。原始地況之平均風速剖面如圖 3.11 所示，由圖可發現原始 C 地況剖面下半部略微不足 0.15 冪次之形狀，且於 B 位置之形狀差異又更為凹陷，剖面橫向分布之均勻性較差；在擾動剖面部分則落於 ESDU 85020 文獻建議值內(圖 3.12)，但仍可看出 AB 兩剖面之差異，亦代表橫風向流場剖面變化較不均勻。由於原始風速剖面形狀與設定之 C 地況 0.15 冪次差異較大，本研究先依文獻方式進行渦流產生器尺寸計算與製作，新製地況擺設條件同樣列於表 3.1。圖 3.13 將各位置剖面之平均風速結果，圖示中 case01 後之 W

開頭為採用熱線式測速儀進行量測，與其相對應若為 C 開頭則為採三維動態皮托管進行量測。由圖可發現以文獻建議之渦流產生器尺寸進行試驗之平均風速剖面結果與理論值十分相近，整體而言，於不同位置所量測之結果差異性皆落於 $\pm 3\%$ 內。在擾動風速剖面部分(圖 3.14)，則略低於現有地況結果，但整體除 D 位置擾動風速略低外，於邊界層半高內仍落於容許範圍內。

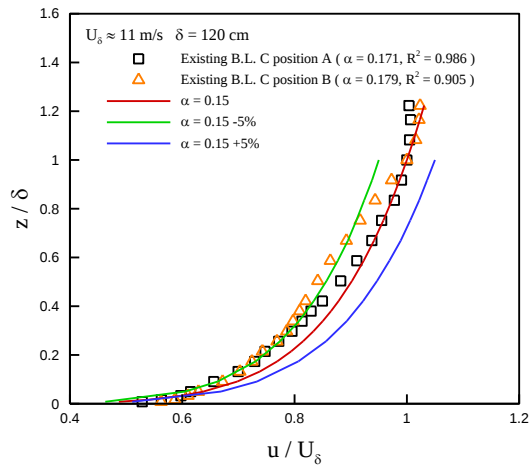


圖 3.11 原有 1/250 C 地況
平均風速剖面

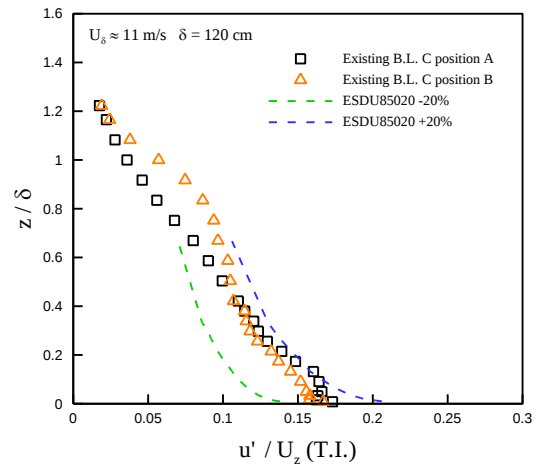


圖 3.12 原有 1/250 C 地況
擾動風速剖面

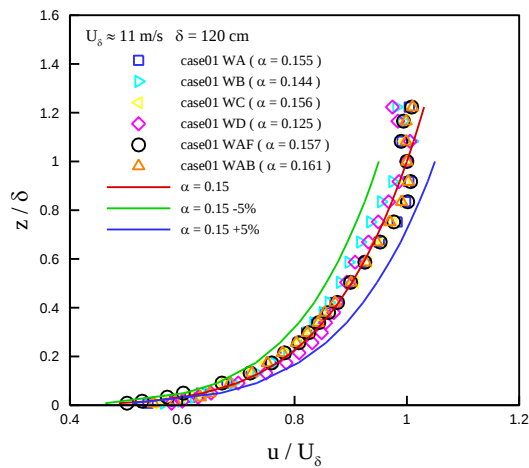


圖 3.13 case01 平均風速剖面(wire)

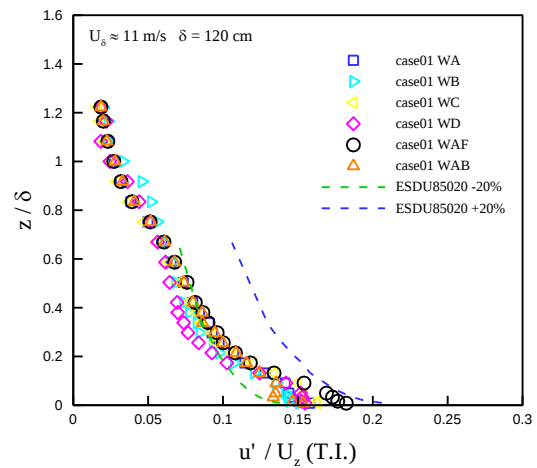


圖 3.14 case01 擾動風速剖面(wire)

(資料來源：本研究整理)

另在紊流積分尺度比較上，圖 3.15 與 3.16 呈現類似結果，其分布約略落於 0.25 至 0.5 m 內，由於在風洞內產生之紊流尺度基本上與上游之渦流產生器幾何外型相關，由於本案採用之三角外型下寬上窄，紊流積分尺度約略隨

高度之增加略為下降。

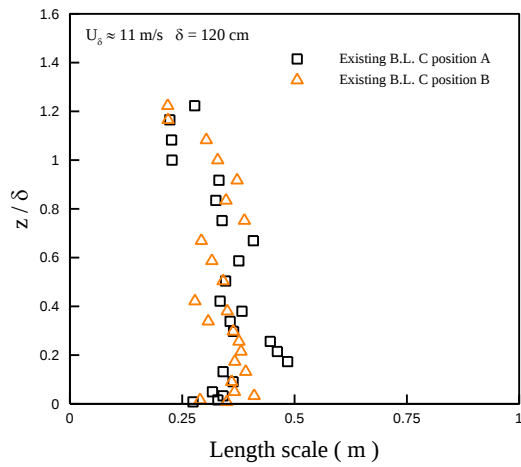


圖 3.15 原有 1/250 C 地況
紊流積分長度尺度剖面

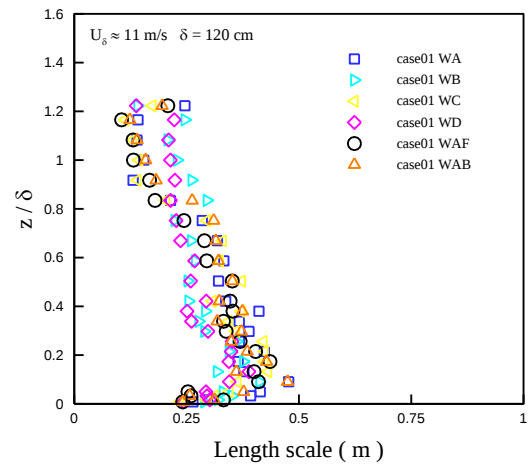


圖 3.16 case01
紊流積分長度尺度剖面(wire)

(資料來源：本研究整理)

表 3.1 1/250 C 地況之地況參數

	渦流產生器 spire01					地表粗糙元素 rn01	
	高度 h (cm)	寬度 b (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
現有 1/250 C 地況	160	30	120	3	6	80	720
case01	155	16.5	77	5	6.25	80	720

(資料來源：本研究整理)

在紊流頻譜密度函數部分，圖 3.17 顯示現有地況條件下，不同高程之風速計算結果與 von Karman 頻譜公式比對結果。由結果可發現在離地 10 cm 內，由於受地面效應影響與限制渦流尺寸，試驗量測之頻譜密度函數在中高頻區域略高於 von Karman 頻譜預測結果，但高於此範圍後，直至邊界層厚度內，試驗量測之頻譜結果相當接近 von Karman 頻譜。圖 3.18 為 case01 之紊流頻譜密度函數結果，同樣地在近地面處中高頻區域略高於 von Karman 頻譜預測結果，而於其他位置能量分布皆與理論值接近，基本上在本試驗中所量測之紊流能量分布皆滿足理論之衰減斜率。

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究

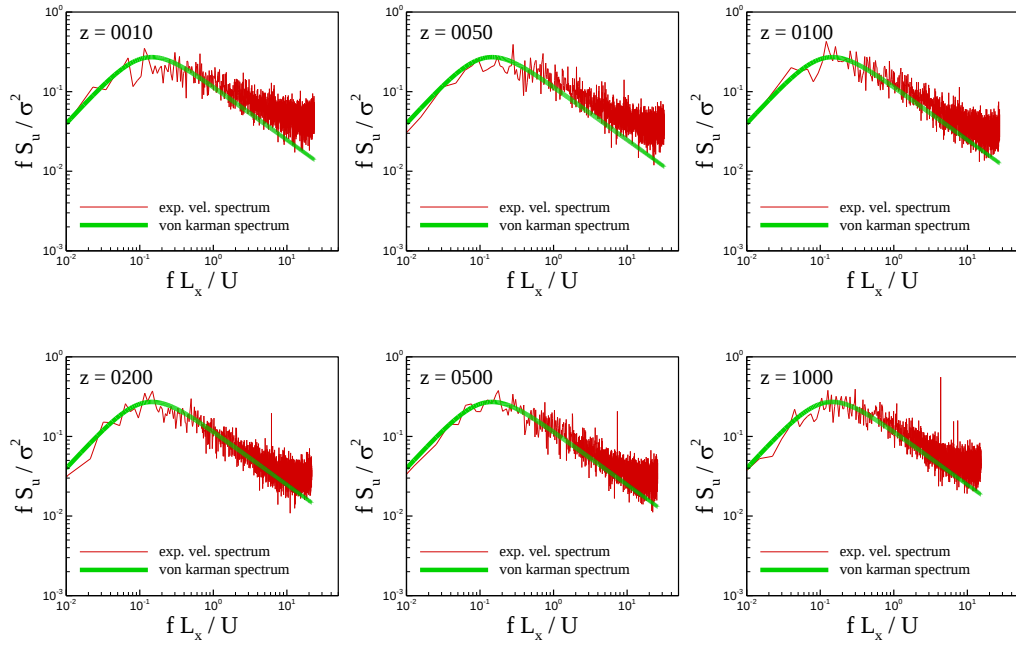


圖 3.17 原有 1/250 C 地況紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm)

(資料來源：本研究整理)

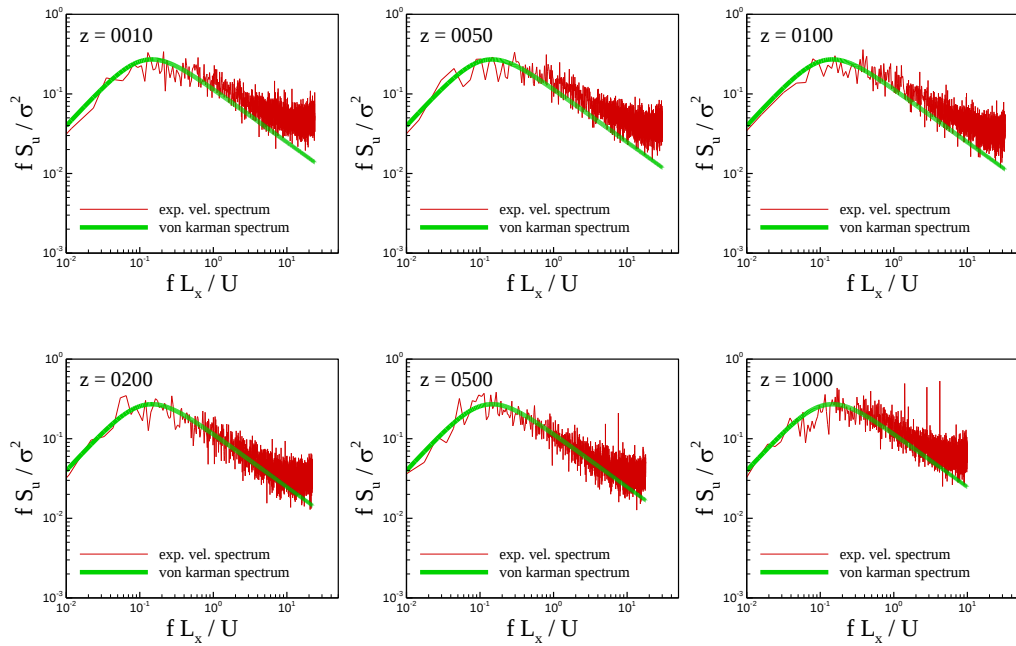


圖 3.18 case01 紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm) (wire)

(資料來源：本研究整理)

前述試驗結果顯示新設定之渦流產生器與地況擺設應可適用 1/250 縮尺 C 地況條件，為了後續試驗便利性，在確認熱線探針結果之紊流能量分佈符合理論趨勢後，以三維動態皮托管進行重複實驗並比對結果。圖 3.19 至 3.22

為以三維動態皮托管量測之平均風速、紊流強度、紊流積分尺度與風頻譜試驗結果，將結果與熱線探針量測結果相比對可發現兩者無明顯差異。在頻譜部分，三維動態皮托管雖略缺失高頻段能量狀態，但整體趨勢與熱線探針一致，基於此比對結果，後續量測皆採三維動態皮托管進行試驗量測。

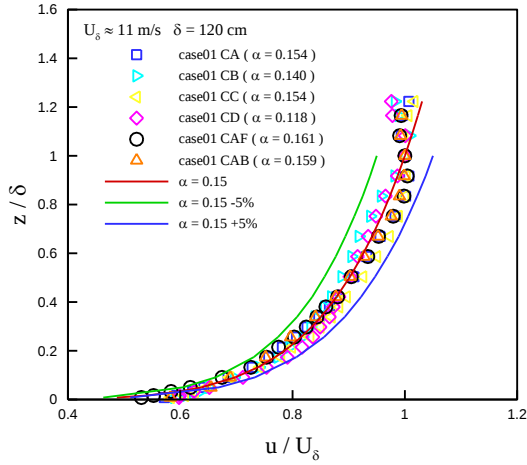


圖 3.19 case01 平均風速剖面(cobra)

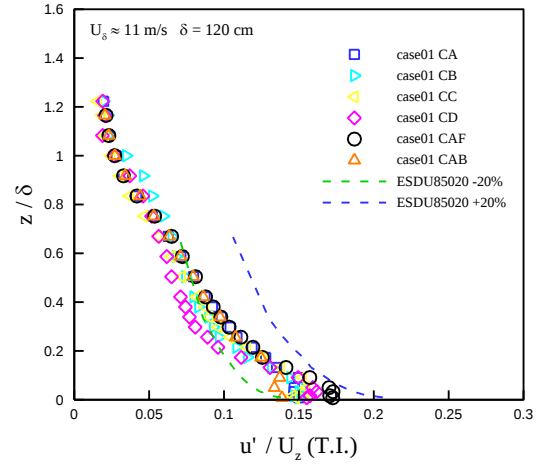


圖 3.20 case01 擾動風速剖面(cobra)

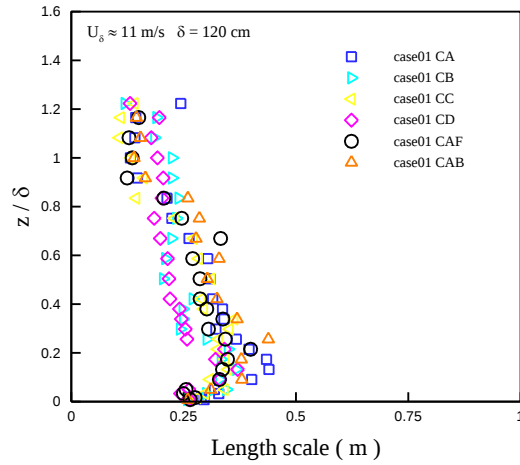


圖 3.21 case01 紊流積分長度尺度剖面(cobra)

(資料來源：本研究整理)

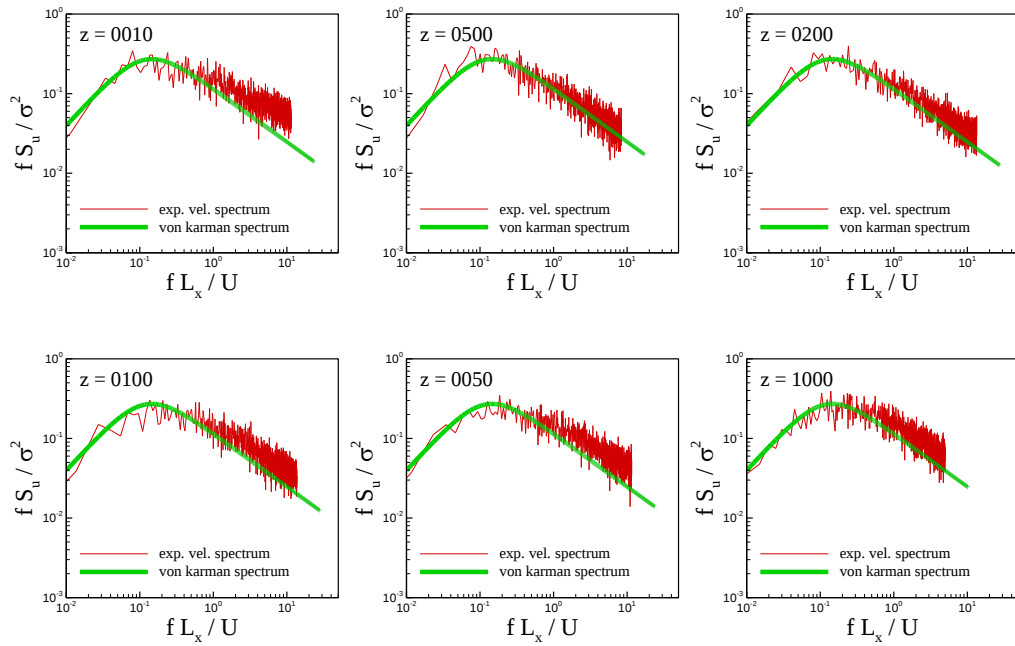


圖 3.22 case01 紊流頻譜密度函數 (z 單位: mm) (cobra)

(資料來源: 本研究整理)

完成 1/250 縮尺 C 地況後接續進行測試 1/100、1/50 縮尺之 C 地況條件，以及其餘三種縮尺之 B 地況條件，由於進行多次調整與測試，研究中定義數個關鍵參數以快速了解試驗參數改變之影響，包含後續進行之試驗條件將列於附錄六，並詳列渦流產生器與地表粗糙元素之尺寸與排列方式以供後續相關研究參考。平均風速剖面即以數據回歸出之指數冪次 α 值為主要指標，並計算試驗值與目標值之平均誤差；紊流強度剖面部分則以近地表處之平均紊流強度為指標；紊流積分尺度則以邊界層近地面下半部之平均值作為主要指標，另檢視風速頻譜是否符合 von Karman spectrum 形式。附錄七將各試驗案例之指數冪次 α 值、近地表處之平均紊流強度與紊流積分尺度資訊整理列表，亦供後續相關研究參考。

2. 1/100 縮尺 C 地況

1/100 縮尺之 C 地況使用 spire02 作為主要渦流產生器，並改變其間距、地表粗糙元排列長度等進行量測，試驗案例為 case04 至 case15 與 case20 至 case25。由試驗量測與調整過程中發現，由於渦流產生器在上游阻擋流場區域，並直接影響平均風速剖面，由試驗結果約略顯示出，當渦流產生器之數

量低於四支時，橫向剖面之均勻性較差，需調整渦流產生器間距與位置並進行量測調整。紊流強度部分由試驗結果發現剖面變化不明顯，最大紊流強度約在 14%至 16%之間，約略符合設定條件。紊流積分尺度分布則約由 0.4 至 0.7 m 範圍內，由於流場中主要渦流尺度亦由渦流產生器產生，若欲增加長度尺度則需更大之渦流產生器或改採主動設施產生。

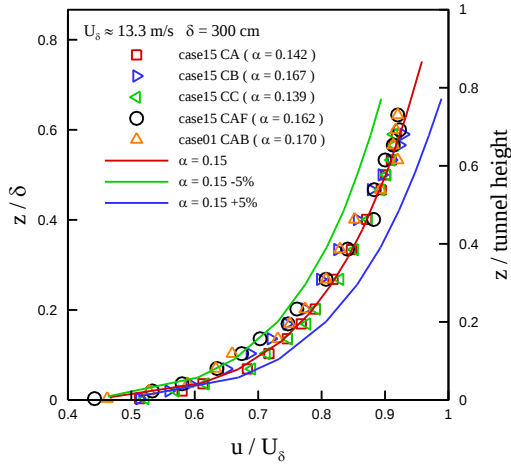


圖 3.23 case15 平均風速剖面

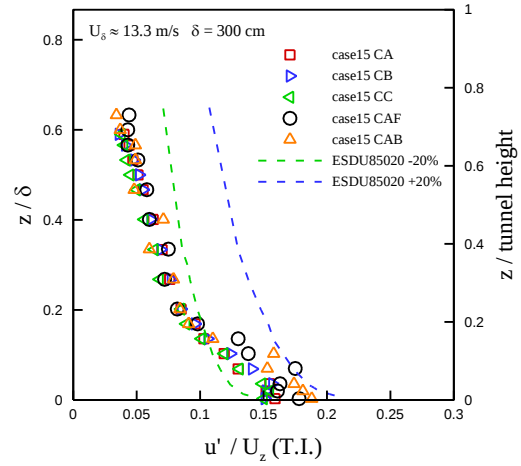


圖 3.24 case15 擾動風速剖面

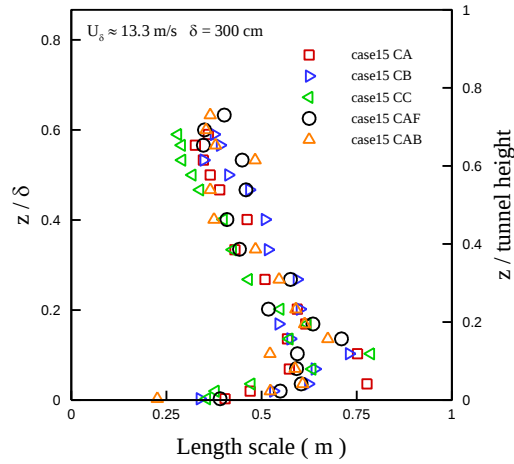


圖 3.25 case15 紊流積分長度尺度剖面

(資料來源：本研究整理)

由試驗結果以 case15 為最符合 C 地況之設定，將其剖面資訊繪製如圖 3.23 至 3.25。若以 1/100 縮尺為比例，平均風速剖面於 180 cm 內皆符合 0.15 冪次分佈，約為 0.6δ 。紊流強度雖在地表附近 30 cm 內落於設定範圍內，但

再提升高度時則快速衰減，因此另進行 case20 至 case25 改變地表粗糙物排列測試，但由結果顯示並無法有效上抬紊流強度分佈。因此，以現有排列狀況於風洞底部 50 cm 高內仍符合設定值，若高於此高度則採此縮尺地況需審慎考量。紊流積分尺度分布則約由 0.4 至 0.75 m 範圍內，由於流場中主要渦流尺度亦由渦流產生器產生，若欲增加長度尺度則需更大之渦流產生器或改採主動設施產生。另在紊流頻譜部分，與前述狀況相同，除近地表與層緣處外，於所有量測剖面之頻譜分佈皆近似於 von Karman spectrum 分佈(圖 3.26)。最終地況擺設條件列於表 3.2。

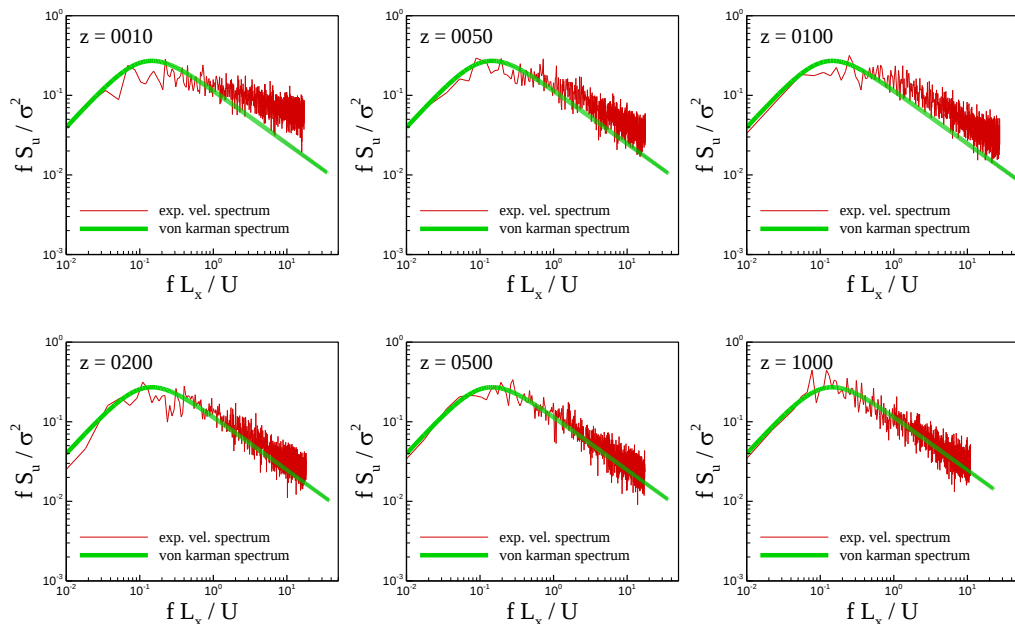


圖 3.26 case15 紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm)

(資料來源：本研究整理)

表 3.2 1/100 C 地況之地況參數

	渦流產生器 spire02					地表粗糙元素 m01	
	高度 h (cm)	寬度 b (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
Case15	239	26.1	100	4	7.9	80	1600

(資料來源：本研究整理)

3. 1/50 縮尺 C 地況

由 1/100C 地況之試驗結果可發現整體紊流強度有隨高度略微偏低之情況，研究中測試加大尺寸之渦流產生器(case26 至 case30)，由於其高度已超過風洞尺寸，於風洞高之頂端處切齊形狀為梯形。研究中經測試調整後最終於 spire07 半部加裝延伸擋板使其增加底部速度虧損，進而微調平均風速剖面。最終 1/50 剖面資訊繪製如圖 3.27 至 3.29，與 1/100 相同，僅模擬邊界層下部分約 0.3δ 範圍，平均風速剖面與目標值誤差約為 2.5%；增加渦流產生器尺寸後明顯提升整體之紊流強度，大部分區域皆落於預設目標範圍內。紊流積分尺度分布因渦流產生器尺寸增大亦明顯增加，約由 0.6 至 1 m 範圍內，高於風洞半高後略隨高度上升而降低。另在紊流頻譜部分亦無異於前述狀況，除近地表處外，於所有量測剖面之頻譜分佈皆近似於 von Karman spectrum 分佈(圖 3.30)。

表 3.3 1/50 C 地況之地況參數

	渦流產生器 spire07						地表粗糙元素 rn01	
	高度 h (cm)	底寬 b_b (cm)	頂寬 b_t (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
Case30	258	60	20	120	3	7.3	80	1600
bd2	90	90	40					

(資料來源：本研究整理)

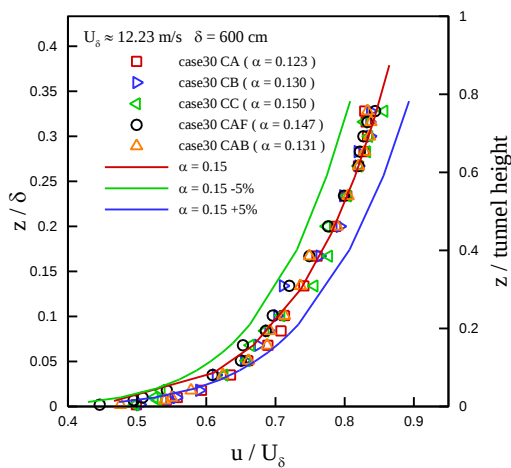


圖 3.27 case30 平均風速剖面

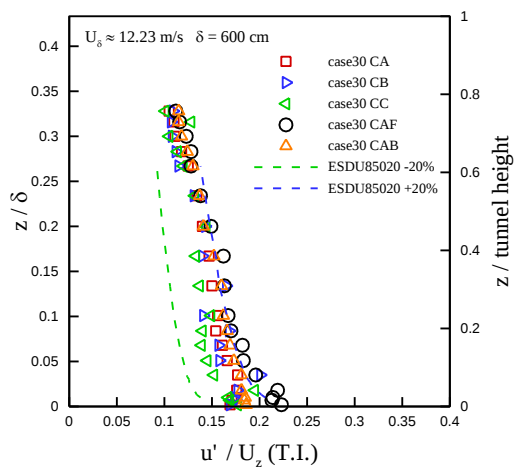


圖 3.28 case30 擾動風速剖面

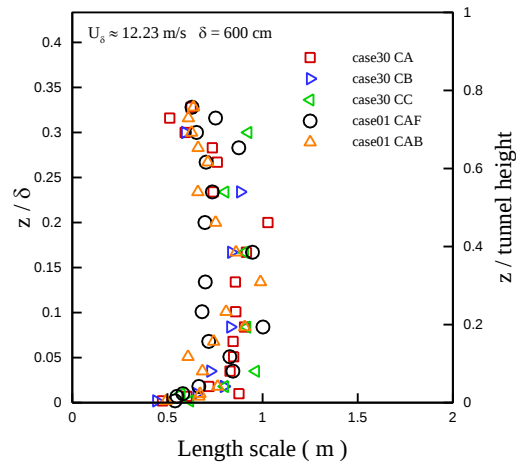


圖 3.29 case30 紊流積分長度尺度剖面

(資料來源：本研究整理)

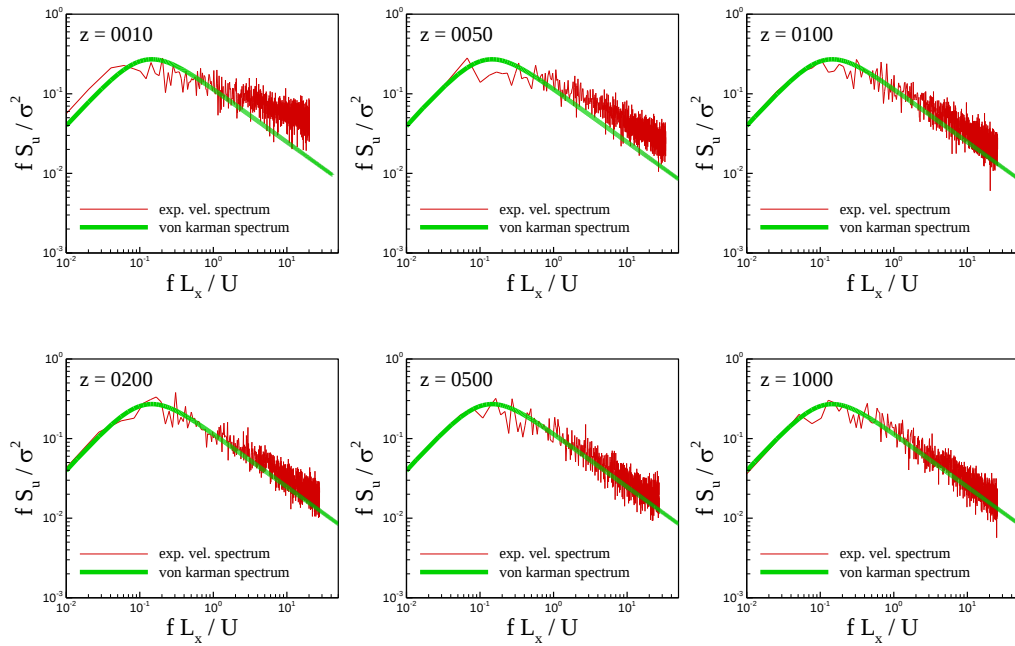


圖 3.30 case30 紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm)

(資料來源：本研究整理)

4. 1/250 縮尺 B 地況

檢視風洞實驗室現有之 1/250 B 地況之平均風速剖面(圖 3.31)，由圖可發現原始 B 地況剖面近地剖面風速略微偏高於 0.25 冪次之形狀；在擾動剖面部

分雖於近地處略為偏高，但仍皆落於 ESDU 文獻建議值內(圖 3.32)，不過剖面仍有改進空間。本案亦依文獻方式重新計算渦流產生器尺寸與製作，新製地況擺設條件列於表 3.4。試驗結果以 case41 為最符合 1/250 縮尺 B 地況之設定，其剖面資訊繪製如圖 3.33 至 3.35。平均風速剖面於 190 cm 內皆符合 0.25 冪次分佈，誤差約為 3.5%。紊流強度於邊界層半高內皆落於設定範圍內，而紊流積分尺度分布則約由 0.5 至 0.8 m 範圍內。紊流頻譜部分參照圖 3.36，除近地表與層緣處外，於所有量測剖面之頻譜分佈皆近似於 von Karman spectrum 分佈。

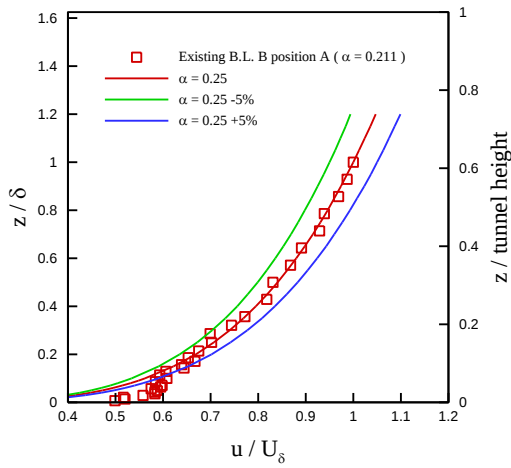


圖 3.31 原有 1/250 B 地況
平均風速剖面

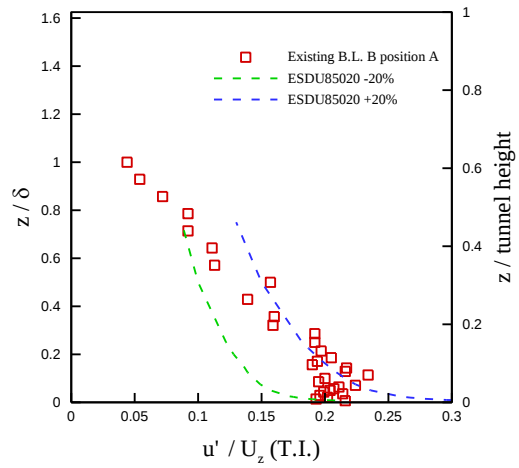


圖 3.32 原有 1/250 B 地況
擾動風速剖面

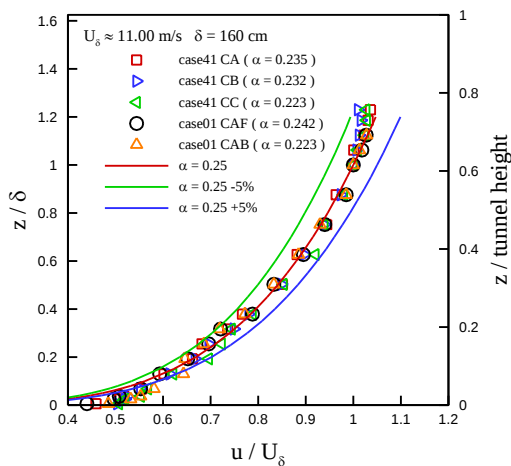


圖 3.33 case41 平均風速剖面

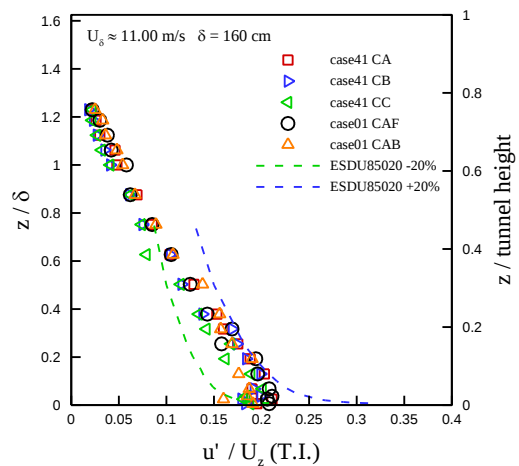


圖 3.34 case41 擾動風速剖面

(資料來源：本研究整理)

表 3.4 1/250 B 地況之地況參數

	渦流產生器 spire04					地表粗糙元素 rn02	
	高度 h (cm)	寬度 b (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
Case41	198	30	100	4	9.5	80	1640

(資料來源：本研究整理)

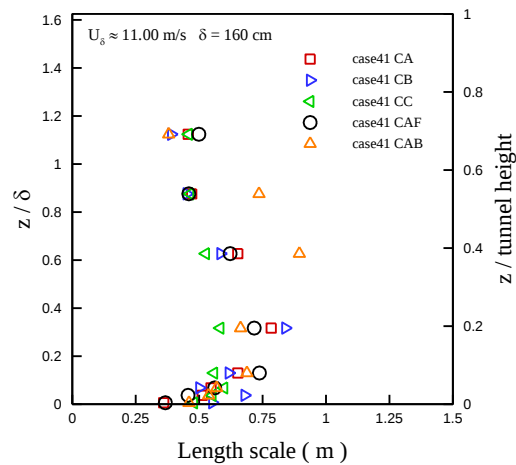


圖 3.35 case41 紊流積分長度尺度剖面

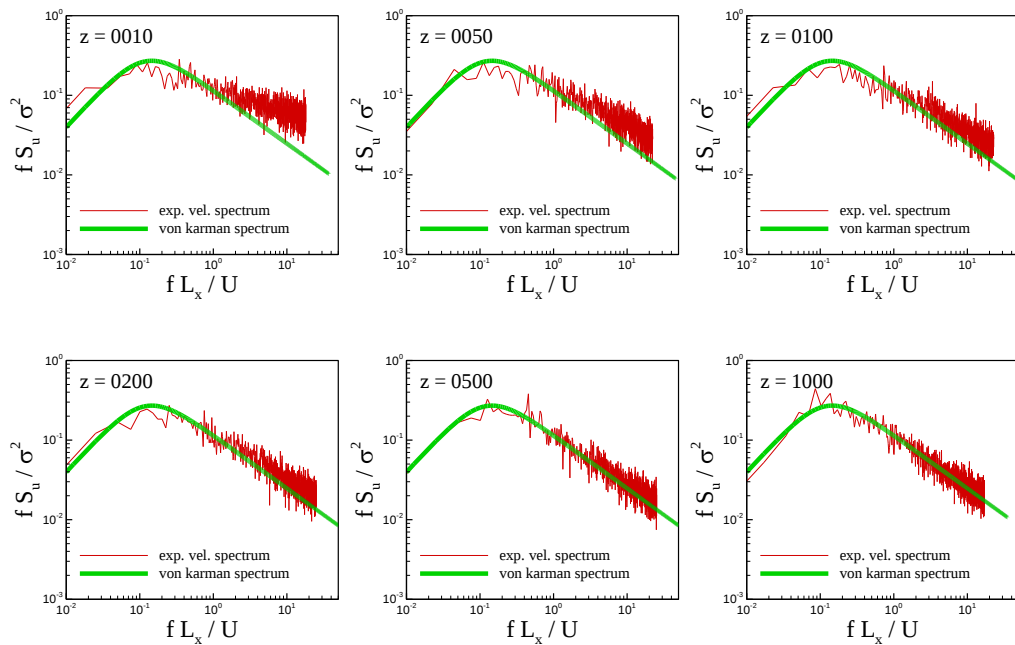


圖 3.36 case41 紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm)

(資料來源：本研究整理)

5. 1/100 縮尺 B 地況

1/100 縮尺於試驗中發現僅靠加大渦流產生器方式無法調整出對應剖面，因此採取增加阻牆方式調整，試驗結果以 case45 為最符合 1/100 縮尺 B 地況之設定，將其剖面資訊繪製如圖 3.37 至 3.39，新製地況擺設條件列於表 3.5。B 地況調整時發現最外側 C 處位置偏差較大，誤差約為 17%，而其餘位置誤差皆約為 6%。紊流強度部分則接落於 ESDU 建議範圍內。紊流積分尺度分布則約由 0.75 至 1.25 m 範圍內。紊流頻譜部分，皆同於前述狀況，除近地表處外，於所有量測剖面之頻譜分佈皆近似於 von Karman spectrum 分佈(圖 3.40)。

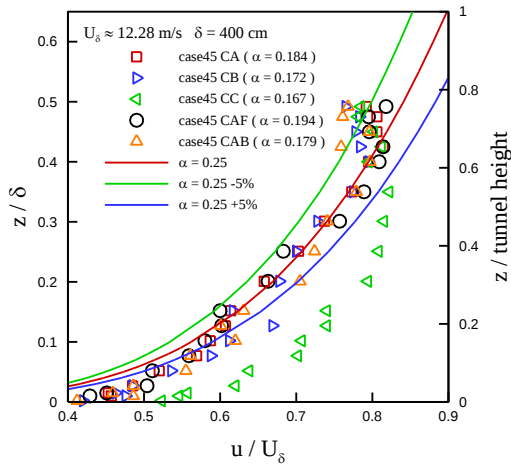


圖 3.37 case45 平均風速剖面

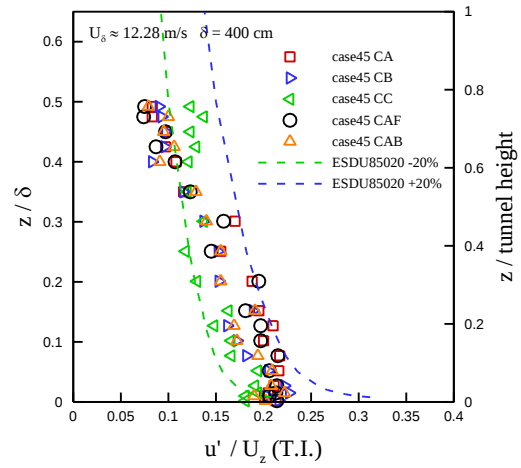


圖 3.38 case45 擾動風速剖面

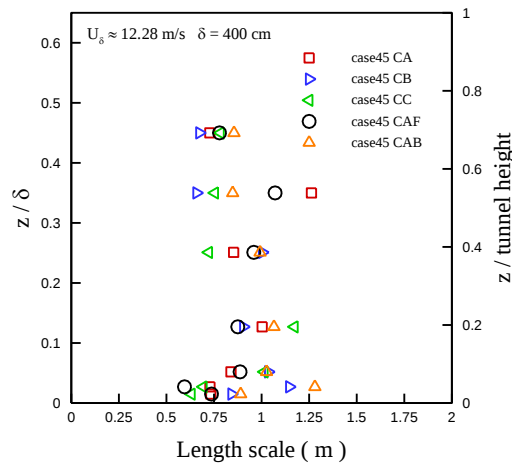


圖 3.39 case45 紊流積分長度尺度剖面

(資料來源：本研究整理)

表 3.5 1/100 B 地況之地況參數

	渦流產生器 spire08+ 35cm 阻牆					地表粗糙元素 rn02		
	高度 h (cm)	底寬 b _b (cm)	頂寬 b _t (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
Case45	258	60	10	120	3	9.5	80	1840

(資料來源：本研究整理)

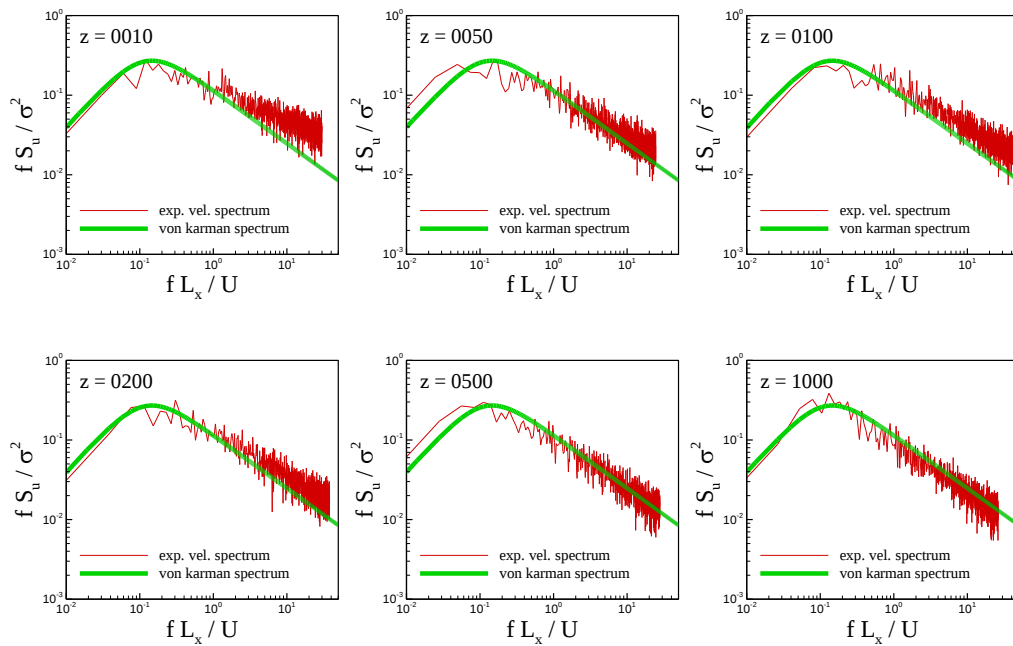


圖 3.40 case41 紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm)

(資料來源：本研究整理)

6. 1/50 縮尺 B 地況

1/50 縮尺採 1/100 縮尺相同之渦流產生器，並藉由改變地表粗糙元素之幾何尺寸增加地表糙度。經測試調整後最終以 case48 最接近設定狀況(設置列於表 3.6)，剖面資訊繪製如圖 3.41 至 3.43，模擬範圍僅邊界層下部分約 0.2 δ ，平均風速剖面與目標值誤差約為 6%，於 C 處位置仍出現較差之風速剖面，誤差約為 10%；紊流強度大部分皆落於預設目標範圍內。紊流積分尺度分布於 0.7 至 1.1 m 範圍內。圖 3.44 顯示在紊流頻譜部分皆除近地表處外，於所有量測剖面之頻譜分佈皆近似於 von Karman spectrum 分佈。

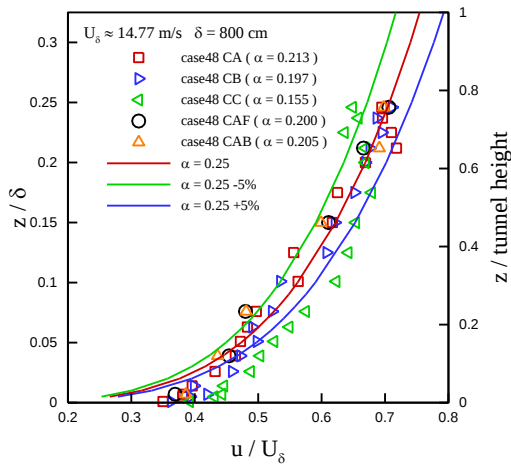


圖 3.41 case48 平均風速剖面

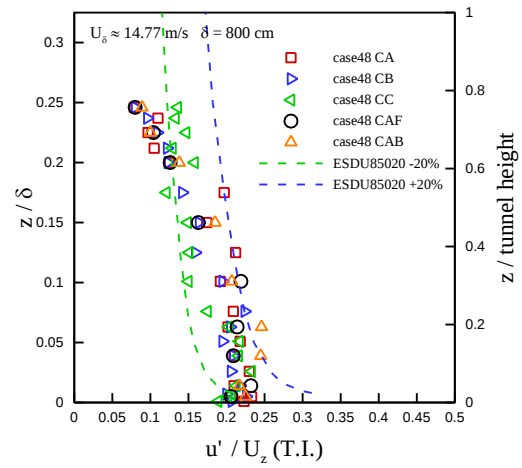


圖 3.42 case48 擾動風速剖面

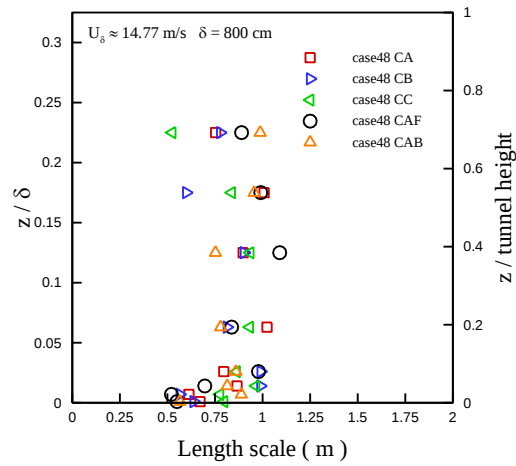


圖 3.43 case48 紊流積分長度尺度剖面

(資料來源：本研究整理)

表 3.6 1/50 B 地況之地況參數

渦流產生器 spire08+ 35cm 阻牆							地表粗糙元素 rn02	
	高度 h (cm)	底寬 b _b (cm)	頂寬 b _t (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
Case48	258	60	10	120	3	9.5	80	後 720
							地表粗糙元素 rn03	
							80	前 1120

(資料來源：本研究整理)

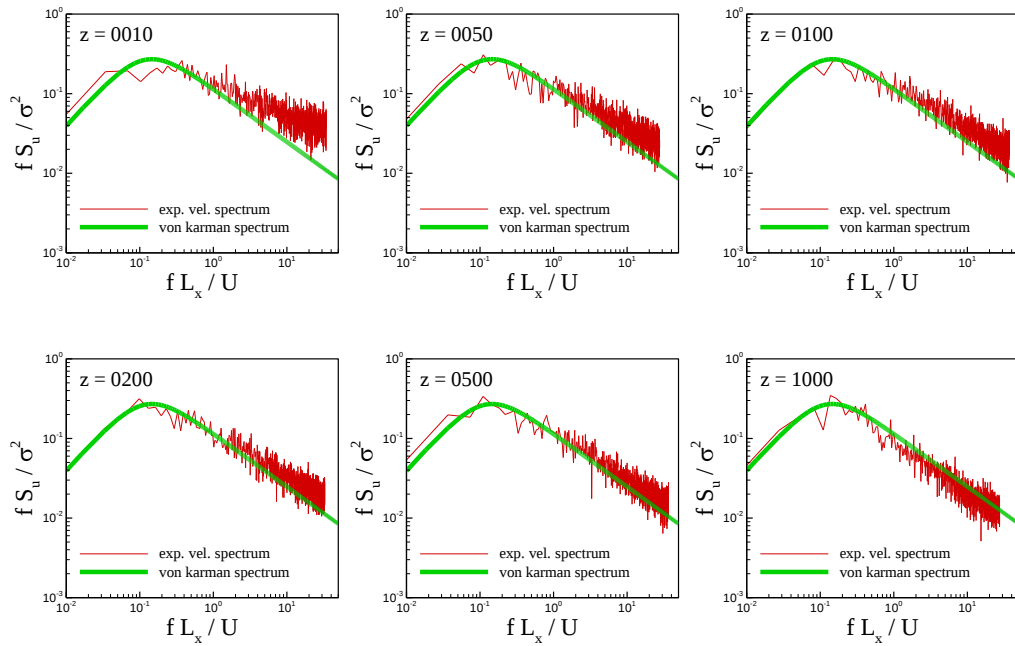


圖 3.44 case48 紊流頻譜密度函數 (z 單位：mm)

(資料來源：本研究整理)

7. 流場縱向穩定度

於試驗中亦量測各縮尺地況量測中心處前後 60 cm 位置之風速剖面(CAF 與 CAB)，檢視各風速剖面資料可發現並無明顯差距，於前後 60 cm 之試驗範圍內應可視為穩定流場，但若有超出此範圍之試驗需求，則應需另進行試驗確認。另在流場縱向壓力梯度部分，於試驗區域內應確認無顯著壓力梯度以避免流場有加減速之現象發生，研究中另設計機構進行量測。試驗採兩支皮托管進行量測，分別量測其靜壓資料，前方皮托管固定於中心前方 60 cm 處，下游皮托管則由前方 30 cm 處移動至下游 120 cm 處，如圖 3.45 與圖 3.46 所示。以 C 地況 1/50 縮尺為例，表 3.7 為量測結果，基本上在試驗前後 60 cm 範圍內壓力梯度約為 1 Pa/m 左右，更往下游 60 cm 亦約在此範圍內，於試驗條件下無明顯壓力梯度出現。

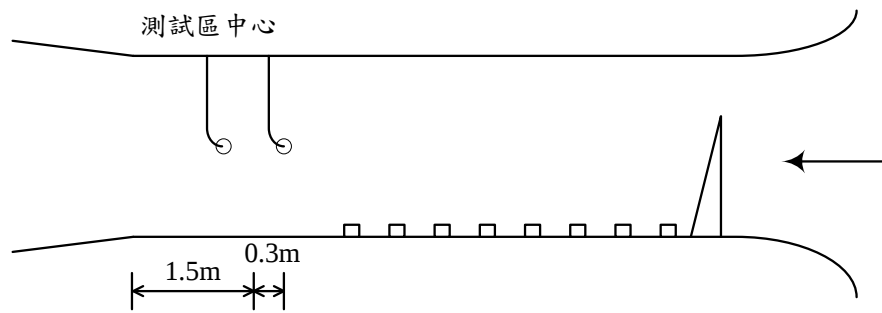


圖 3.45 壓力梯度量測示意圖

(資料來源：本研究繪製)



圖 3.46 壓力梯度量測試驗架設

(資料來源：本研究拍攝)

表 3.7 壓力梯度

距離中心位置 (cm)	dp/dx (Pa/m)
-30	0.59
0	0.95
30	1.00
60	0.71
90	0.69
120	0.67

(資料來源：本研究整理)

第四節 縮尺地況調整過程

在地況調整過程中改變相當多參數進行重複量測，並檢視結果決定後續調整之方式，此節將較明確產生變化之調整方式進行說明，並供以未來需要改變地況時之參考。

1. 渦流產生器位置與間距之影響

在案例 case33 至 case41 測試了渦流產生器距離量測處 7.5H 至 9.5H 以及其間距 SPD 由 80cm 至 100 cm 之變化。由整理圖 3.47 可發現在 SP 為 7.5H 與 8.5H 時，SPD 降低會使 α 略為提升，而當 SP 為 9.5H 後，SPD 改變所造成之效應變的不明顯。而在剖面均勻度上，隨著 SP 增加平均風速剖面有較均勻之趨勢。而在近地表紊流強度部分，圖 3.48 顯示在 SP 為 7.5H 與 8.5H 時，SPD 降低會略為提升紊流強度，而當 SP 為 9.5H 後，較高的 SPD 反而會產生較大之近地紊流強度，但其整體變化值約略由 15%-20%之間。

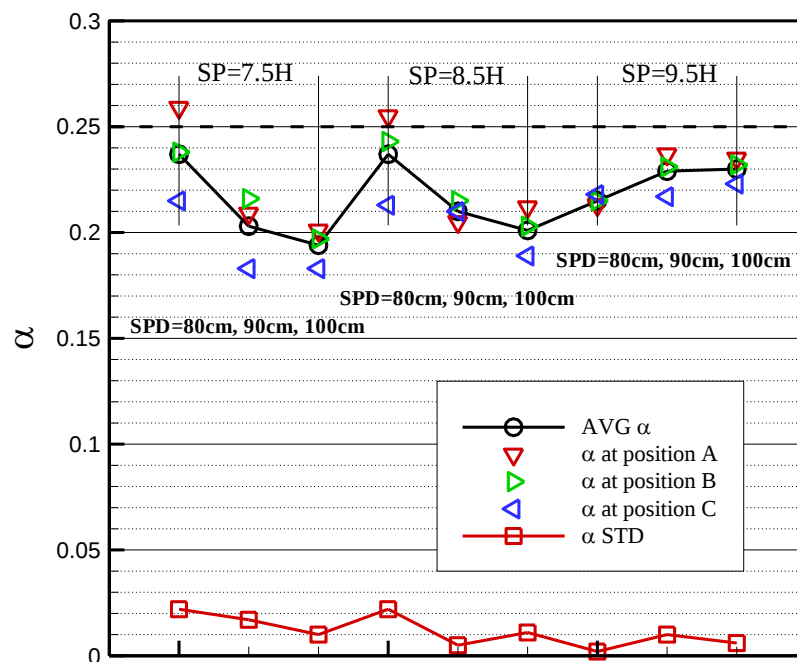


圖 3.47 SP、SPD 與 α 值之變化關係

(資料來源：本研究整理)

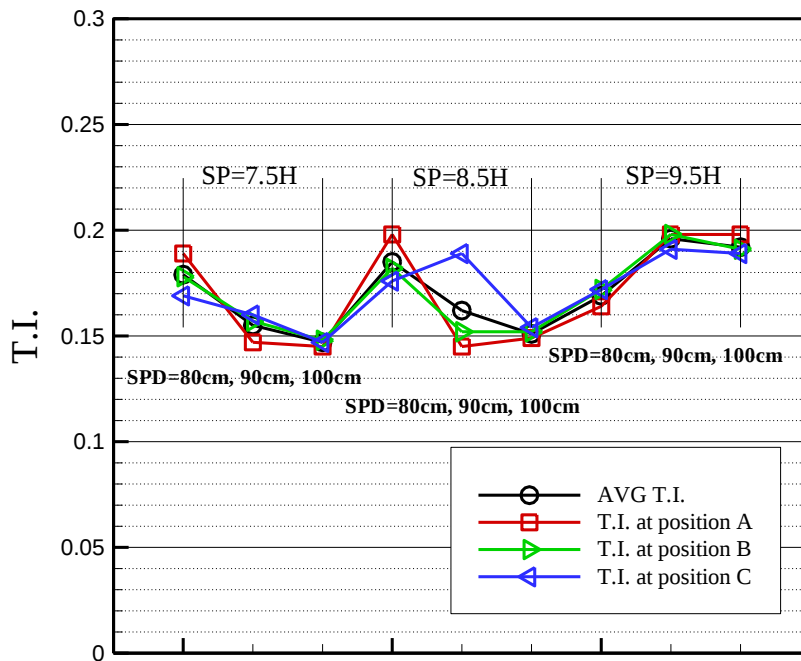


圖 3.48 SP、SPD 與紊流強度之變化關係

(資料來源：本研究整理)

2. 渦流產生器尺寸之影響

在案例 case26 至 case28 測試了渦流產生器尺寸改變之變化，其幾何尺寸與粗糙元素排列方式列於表 3.8，並將尺寸改變後之量測統計值整理於表 3.9。由表可知，雖然渦流產生器尺寸加大，但斜率變化不明顯之情況下，剖面 α 值並不會有顯著變化；而積分長度尺度與紊流強度則很明確與渦流產生器尺寸相關，檢視整理圖 3.49 可見紊流強度與積分尺度之增長，但於近地表處之紊流強度由於仍與地表粗糙元素尺度相關，對其最大值並無明顯影響。

表 3.8 渦流產生器尺寸

	渦流產生器 spire05						地表粗糙元素 rn01	
	高度 h (cm)	底寬 b _b (cm)	頂寬 b _t (cm)	間距 SPD (cm)	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D (cm)	鋪設範圍 RR (cm)
case26	258	30	10	120	3	7.3	80	1600
case27	258	50	20	120	3	7.3		
case28	258	60	20	120	3	7.3		

(資料來源：本研究整理)

表 3.9 改變渦流產生器尺寸之參數變化

	平均 α 值	α 值(A)	α 值(B)	α 值(C)	平均長度尺度 (m)	平均紊流強度
case26	0.111	0.119	0.105	0.109	0.453	0.091
case27	0.110	0.108	0.109	0.113	0.616	0.118
case28	0.106	0.112	0.105	0.100	0.661	0.130

(資料來源：本研究整理)

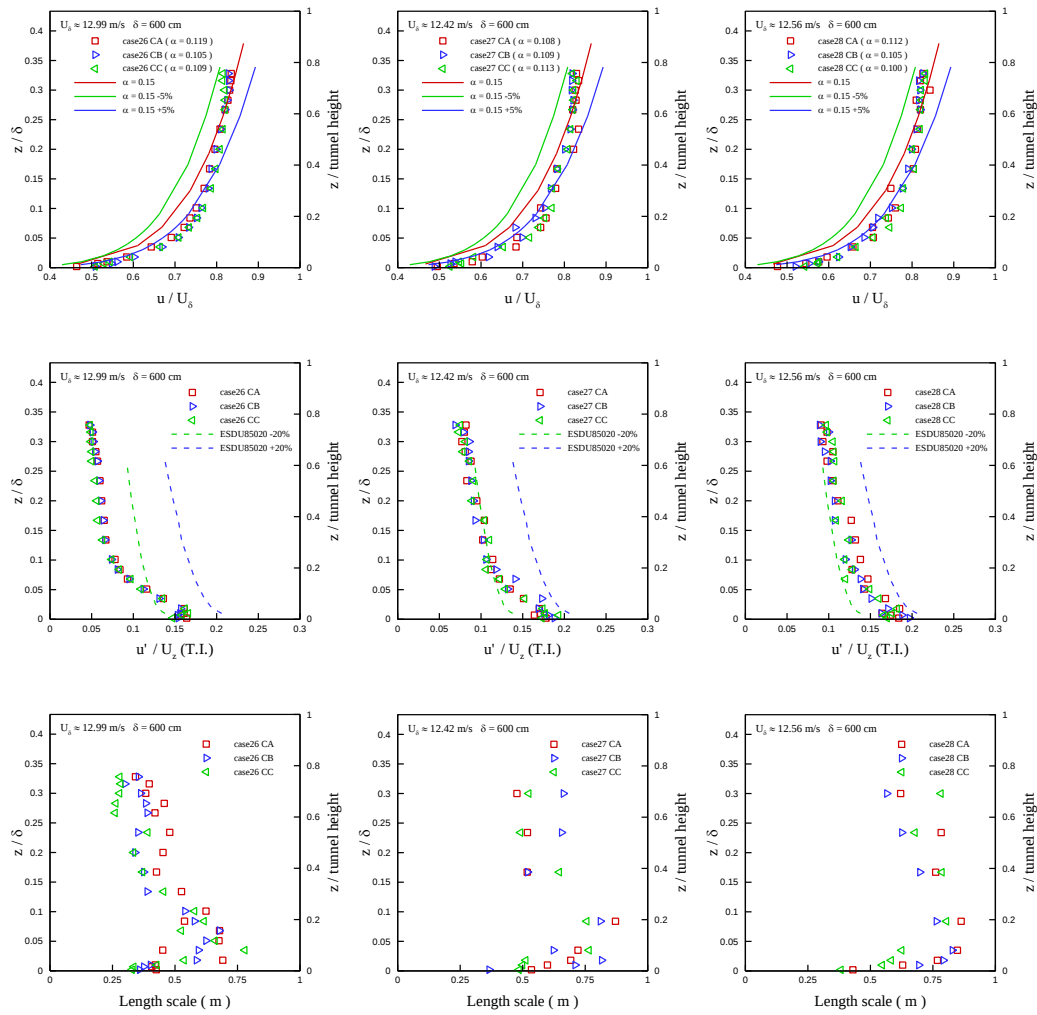


圖 3.49 風速剖面與渦流產生器尺寸之變化關係

(資料來源：本研究整理)

3. 地表粗糙元素尺寸之影響

為了希望增加近地面紊流強度，將粗糙元素幾何外型加大2倍進行測試，如圖 3.50 所示，改變之參數條件如表 3.10。由圖 3.51 結果顯示，增大地表粗糙元素尺寸將增加地表摩擦力，造成剖面 α 值降低，但可能造成過大速度虧損，須測試調整擺設距離。在紊流強度部分則明顯提高近地表處之紊流強度，並略使橫向速度剖面較為均勻。



圖 3.50 混和地表粗糙元排列方式

(資料來源：本研究拍攝)

表 3.10 地表粗糙元參數變化

	渦流產生器 spire06 + 35cm 阻牆						地表粗糙元素 rn02		地表粗糙元素 rn03	
	高度 h	底寬 b_b	頂寬 b_t	間距 SPD	支數	距量測位置 SP (h)	間距 D	鋪設範圍 RR (cm)	間距 D	鋪設範圍 RR (cm)
Case45	258	60	10	120	3	9.5	80	1640	80	-
Case47								-		1640
Case48								520		前 1120

(資料來源：本研究整理)

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究

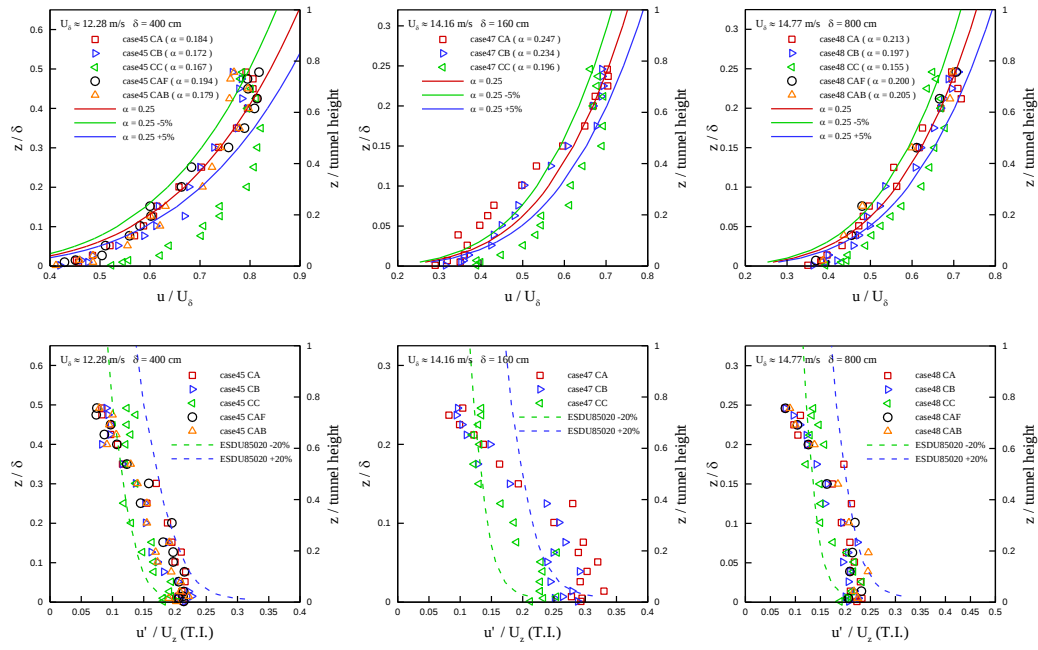


圖 3.51 風速剖面與地表粗糙元尺寸與排列方式之變化關係

(資料來源：本研究整理)

第五節 縮尺模型試驗結果

為了解不同縮尺效應可能造成之試驗誤差，本案製作 3 組不同縮尺之風壓模型，建築物體參考文獻資料，取美國德州科技大學之實場量測建築尺寸設計製作，其外觀、幾何尺寸與量測點位如圖 3.52 與 3.53 所示，其建築尺寸經計算後發現 1/250 縮尺模型尺寸僅剩 $3.7 \times 5.5 \times 1.6$ cm，無法製作與進行量測，因此選定為 1/100 縮尺、1/50 縮尺與 1/25 縮尺，藉由三種尺寸之壓力量測試驗探討模型縮尺之影響(尺寸如表 3.11)。



圖 3.52 TTU 量測建築外觀

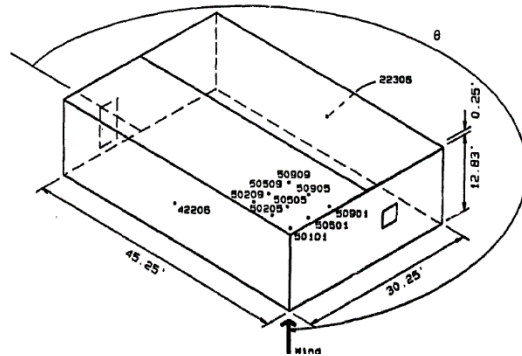


圖 3.53 TTU 量測建築尺寸與點位

(資料來源：文獻 Lin 等人(1995)、Mehta 等人(1992))

表 3.11 實際建物與縮尺模型尺寸

	寬 (cm)	長 (cm)	高 (cm)
實際建築物尺寸	922.02	1379.22	398.68
1/100 縮尺	9.22	13.79	3.99
1/50 縮尺	18.44	27.58	7.97
1/25 縮尺	36.88	55.17	15.95

(資料來源：本研究整理)

1. 風壓模型試驗條件

由於 TTU 建物之位置地況較接近於 C 地況，研究中將試驗來流條件設為 1/250 與 1/50 之 C 地況來流擺設，並取文獻資料壓力點 50101 與 50501 兩處典型位置之平均、擾動與極值壓力值進行比對。資料比對參考文獻 Tieleman

等人(1996)之內容，其分析了現場 860 筆資料並製圖，且所選之壓力資料量測之風速於現場建築高處皆大於 8 m/s 以上，單一筆資料擷取時間為 15 分鐘。由於在風洞內之試驗時間有限，本案無法取相同數量之試驗資料分析，經時間縮尺後取 10 段等長 15 分鐘之擷取時間並進行量測，模型之壓力管連接於 scanivalve 電子式壓力掃描系統進行量測，試驗風速於模型高處設定為 8 m/s，使風速縮尺為 1，時間縮尺即可由幾何縮尺計算而得，模型連接架設狀況如圖 3.54 所示。



圖 3.54 模型架設示意圖

(資料來源：本研究整理)

試驗分別將縮尺 1/25、縮尺 1/50 與縮尺 1/100 之模型放置於 C 地況 1/250 與 1/50 流場內(圖 3.55 至圖 3.60)，風向角以 15 度為間隔，由 90 度轉至 270 度進行量測，量測資料經下式計算分別得出平均、擾動壓力係數：

$$\text{平均壓力係數} \quad C_p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \bigg/ \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3-1)$$

$$\text{擾動壓力係數} \quad C_p' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n}} \bigg/ \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3-1)$$

另取各分段量測時序內最大壓力值之前 5 數值平均代表極值壓力係數。



圖 3.55 1/250 C 地況 1/100 模型



圖 3.56 1/50 C 地況 1/100 模型



圖 3.57 1/250 C 地況 1/50 模型



圖 3.58 1/50 C 地況 1/50 模型



圖 3.59 1/250 C 地況 1/25 模型



圖 3.60 1/50 C 地況 1/25 模型

(資料來源：本研究整理)

2. 風壓模型試驗結果

由於文獻整理資料點數眾多，為量化實場量測與實驗數據之誤差值，研究中另將對應角度周圍之壓力計算出平均值，以綠色實心點表示，所有風向角之量測值皆與平均值比對計算誤差，整理如表 3.12 至表 3.17，誤差超過 20% 之數值以紅色表示。

圖 3.61 與 3.62 分別為 50101 與 50501 之平均壓力隨風向角變化之分佈，由圖可知實驗值與實場量測數據整體各縮尺皆約略呈現相同趨勢，但於 1/250 縮尺流場下之結果差異較大，以平均誤差而言，1/50 縮尺流場之結果較優於 1/250 縮尺流場結果。

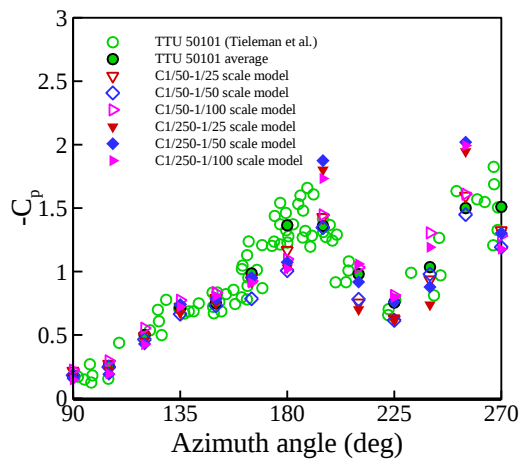


圖 3.61 50101 平均壓力分佈圖

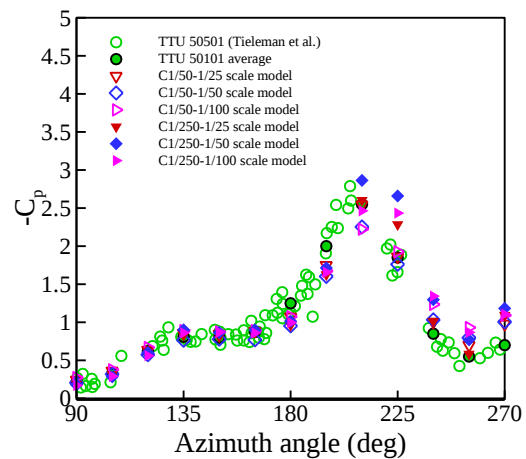


圖 3.62 50501 平均壓力分佈圖

(資料來源：本研究整理)

擾動風壓比對參見圖 3.63 與圖 3.64，類似於平均分佈，比對顯示整體趨勢相當接近，但於 50501 風向角 180 至 225 處，各縮尺流場與縮尺模型量測皆出現明顯低估之狀況。整體而言，於 1/250 流場之結果亦明顯可發現擾動較低於 1/50 之結果，此可由流場之垂直紊流強度分佈解釋，由於 1/250 之地況尺度較小，模型若尺寸比例太大，除本身建築分離造成之擾動外，由於受到較弱之紊流分佈吹襲，導致壓力擾動降低；而 1/50 之縮尺流場其垂直向紊流分佈較為高寬，縮尺較小之模型仍浸於紊流强度高之區域內，又其風速剖

面仍為冪次 0.15，因此差異相對較不明顯。相同理論亦可解釋 1/250 流場內極值分佈(圖 3.65、3.66)亦略低於 1/50 流場之狀況，若壓力平均值接近，則壓力擾動越大之狀況亦將發生較大之壓力極值，由 50101 風向角 225 之結果可很好的解釋此現象，在平均壓力差異不明顯之狀況下，縮尺比例越小之風壓模型量測之擾動值越低，其產生之極值差異亦越大。

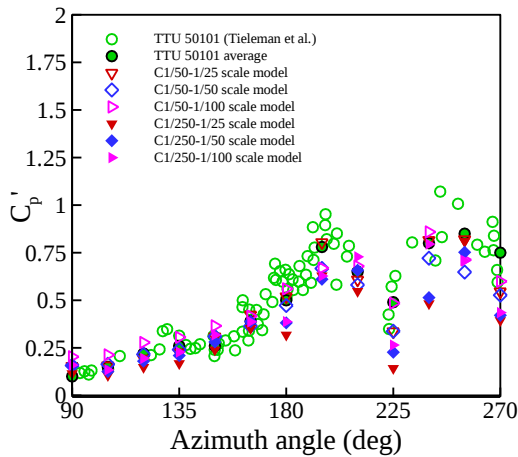


圖 3.63 50101 擾動壓力分佈圖

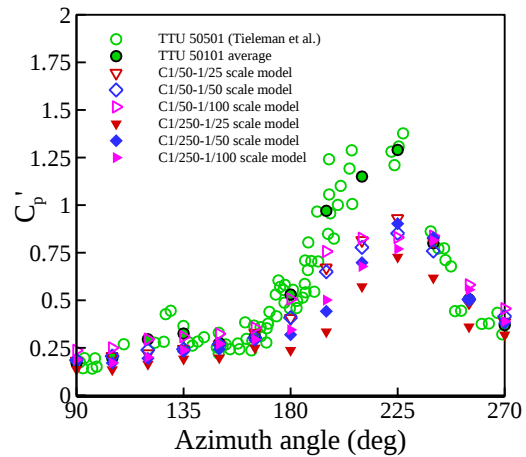


圖 3.64 50501 擾動壓力分佈圖

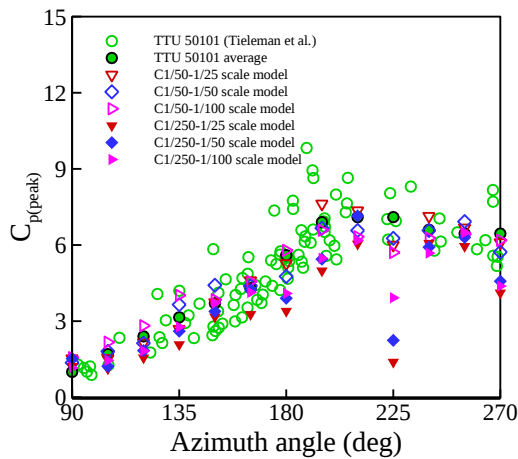


圖 3.65 50101 極值壓力分佈圖

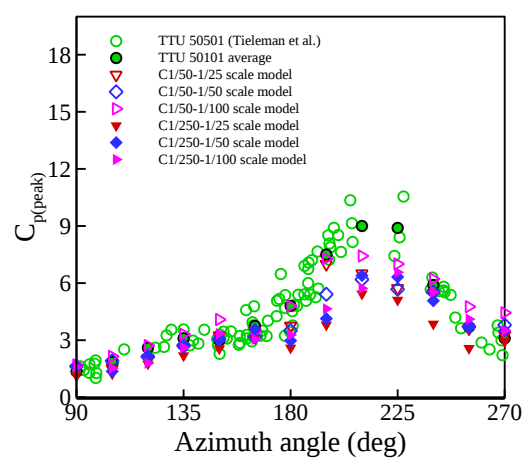


圖 3.66 50501 極值壓力分佈圖

(資料來源：本研究整理)

在 50501 之擾動與極值壓力差異問題，在文獻 Lin 等人(1995)、Tieleman 等人(1996)亦得到類似結果並指出可能原因眾多，包含壓力管尺寸、建築邊角幾何失真、紊流尺度、角渦流雷諾數效應以及實場之非定常效應皆可能影

響。而另 Cochran 等人(1992)提及實場量測之壓力管在更大尺寸之狀況下量測之擾動值與極值下降約達 25%，較接近於實驗量測之值，即實場量測之壓力管尺寸對量測資料影響不可忽視。

表 3.12 50101 平均風壓係數誤差表

地況縮尺	1/50			1/250		
模型縮尺	1/25	1/50	1/100	1/25	1/50	1/100
平均誤差	10.10%	10.77%	12.77%	15.84%	14.64%	16.02%
90	23.49%	4.11%	27.14%	-0.57%	-9.71%	-16.40%
105	6.00%	-3.06%	15.80%	-13.02%	-25.14%	-24.16%
120	-2.14%	-7.02%	10.66%	-9.74%	-14.08%	-15.12%
135	0.99%	-7.09%	8.20%	-5.69%	3.45%	0.98%
150	5.21%	-2.60%	11.11%	-0.05%	4.57%	7.64%
165	-5.63%	-20.23%	-6.07%	-3.30%	-3.42%	-7.59%
180	-14.38%	-26.21%	-19.60%	-24.58%	-21.41%	-25.27%
195	4.98%	-1.02%	6.33%	32.47%	37.80%	27.43%
210	-23.14%	-20.32%	5.29%	-28.51%	-6.38%	8.09%
225	-17.03%	-18.50%	7.42%	-15.80%	0.87%	5.54%
240	-9.58%	-5.38%	26.08%	-28.69%	-15.16%	15.14%
255	6.37%	-3.39%	7.31%	29.73%	34.63%	32.89%
270	-12.32%	-21.07%	-15.01%	-13.81%	-13.72%	-22.06%

(資料來源：本研究整理)

表 3.13 50501 平均風壓係數誤差表

地況縮尺	1/50			1/250		
模型縮尺	1/25	1/50	1/100	1/25	1/50	1/100
平均誤差	11.41%	15.89%	22.06%	13.28%	23.59%	23.52%
90	9.77%	-6.59%	24.36%	-14.50%	-18.45%	-22.50%
105	11.14%	-1.97%	15.78%	-3.35%	-12.74%	-10.83%
120	2.52%	-7.42%	7.95%	0.15%	-2.77%	-9.42%
135	5.74%	-5.70%	9.94%	3.22%	11.25%	6.42%
150	5.64%	-2.78%	9.19%	1.44%	8.17%	8.67%
165	1.09%	-12.05%	1.77%	1.35%	2.75%	0.00%
180	-14.28%	-23.75%	-14.06%	-23.07%	-18.76%	-20.27%
195	-12.54%	-19.90%	-16.16%	-18.69%	-14.32%	-17.19%
210	-0.20%	-11.65%	-12.84%	2.07%	12.31%	-3.34%
225	0.55%	-4.79%	4.17%	23.46%	43.74%	31.57%
240	18.16%	21.48%	45.27%	19.14%	52.58%	58.09%
255	27.04%	45.09%	69.29%	6.04%	39.96%	57.89%
270	39.67%	43.46%	55.96%	56.14%	68.93%	57.90%

表 3.14 50101 擾動風壓係數誤差表

地況縮尺	1/50			1/250		
模型縮尺	1/25	1/50	1/100	1/25	1/50	1/100
平均誤差	14.49%	17.44%	24.02%	28.07%	23.94%	21.27%
90	53.10%	57.30%	103.30%	15.20%	57.80%	59.50%
105	4.27%	9.20%	42.00%	-29.67%	-16.00%	-10.60%
120	-12.55%	-1.95%	26.45%	-32.73%	-18.14%	-11.64%
135	-13.65%	-7.50%	17.38%	-35.46%	-19.31%	-12.38%
150	18.58%	19.04%	40.62%	-7.73%	8.08%	22.27%
165	8.54%	-6.67%	6.90%	-9.62%	-0.44%	-0.85%
180	3.78%	-5.48%	12.06%	-36.46%	-23.72%	-22.48%
195	3.04%	-14.47%	-14.23%	-19.41%	-21.73%	-19.55%
210	-6.52%	-10.63%	4.48%	-15.80%	1.18%	12.06%
225	-31.55%	-31.14%	-1.18%	-70.94%	-53.67%	-45.96%
240	1.87%	-9.86%	7.37%	-39.69%	-35.75%	-0.61%
255	-3.62%	-23.74%	-16.15%	-4.78%	-11.49%	-16.71%
270	-27.31%	-29.76%	-20.08%	-47.48%	-43.88%	-41.96%

表 3.15 50501 擾動風壓係數誤差表

地況縮尺	1/50			1/250		
模型縮尺	1/25	1/50	1/100	1/25	1/50	1/100
平均誤差	14.55%	15.46%	18.11%	35.76%	21.41%	20.93%
90	6.41%	9.00%	39.41%	-19.76%	11.47%	10.41%
105	2.90%	3.30%	24.90%	-32.20%	-14.65%	-14.40%
120	-25.46%	-19.08%	0.17%	-44.20%	-34.03%	-31.97%
135	-25.08%	-25.20%	-5.08%	-41.05%	-29.20%	-26.86%
150	-3.42%	-2.44%	17.75%	-28.11%	-11.75%	-1.60%
165	5.55%	-2.32%	14.84%	-19.52%	-6.52%	0.00%
180	-23.58%	-22.85%	-4.47%	-55.26%	-39.79%	-34.96%
195	-30.82%	-33.00%	-22.01%	-65.51%	-54.43%	-48.33%
210	-29.16%	-32.37%	-28.19%	-50.28%	-39.34%	-41.04%
225	-27.89%	-33.98%	-35.65%	-43.65%	-30.05%	-40.33%
240	1.36%	-5.15%	4.64%	-22.83%	3.61%	1.71%
255	-3.19%	-0.06%	15.07%	-28.61%	-0.77%	10.08%
270	4.38%	12.19%	23.22%	-13.95%	2.65%	5.05%

表 3.16 50101 極值風壓係數誤差表

地況縮尺	1/50			1/250		
模型縮尺	1/25	1/50	1/100	1/25	1/50	1/100
平均誤差	11.37%	11.35%	14.35%	29.10%	22.58%	17.05%
90	52.56%	36.22%	56.01%	22.46%	52.12%	15.64%
105	-9.67%	6.38%	27.60%	-33.80%	-28.40%	-14.55%
120	-10.39%	-11.13%	17.52%	-35.13%	-23.38%	-23.72%
135	-14.78%	15.88%	27.60%	-34.05%	-17.31%	-11.94%
150	0.91%	19.32%	3.96%	-14.35%	-8.53%	0.36%
165	6.97%	2.00%	6.07%	-24.02%	-1.51%	-3.87%
180	-5.89%	-14.96%	3.39%	-39.39%	-30.32%	-26.91%
195	10.45%	-3.38%	-4.60%	-27.75%	-21.11%	-20.63%
210	3.60%	-7.41%	-10.92%	-14.91%	0.65%	-12.84%
225	-15.45%	-11.79%	-19.65%	-80.45%	-68.40%	-44.76%
240	8.13%	-0.40%	-4.92%	-8.02%	-10.38%	-13.90%
255	3.53%	7.35%	-0.23%	-7.73%	-2.31%	0.51%
270	-5.45%	-11.30%	-4.09%	-36.22%	-29.10%	-32.05%

表 3.17 50501 極值風壓係數誤差表

地況縮尺	1/50			1/250		
模型縮尺	1/25	1/50	1/100	1/25	1/50	1/100
平均誤差	14.51%	17.11%	16.70%	30.18%	19.26%	21.22%
90	11.60%	20.44%	26.07%	-16.97%	18.80%	18.01%
105	-18.64%	3.46%	16.30%	-33.22%	-26.28%	-18.08%
120	-21.13%	-18.21%	4.48%	-32.45%	-16.10%	-31.13%
135	-15.70%	-12.18%	6.92%	-29.43%	-15.05%	-15.85%
150	7.99%	1.68%	36.23%	-14.89%	1.91%	11.45%
165	-6.76%	-15.23%	-8.11%	-17.33%	-4.69%	0.00%
180	-21.86%	-26.89%	-0.03%	-45.93%	-38.03%	-31.81%
195	-6.74%	-27.84%	-2.89%	-49.32%	-44.86%	-38.00%
210	-27.79%	-31.23%	-17.49%	-39.64%	-28.94%	-36.41%
225	-35.68%	-36.20%	-21.31%	-42.58%	-28.97%	-26.21%
240	-7.21%	-6.34%	5.34%	-34.68%	-14.08%	-6.36%
255	-2.35%	0.24%	28.60%	-30.49%	0.22%	10.94%
270	5.23%	22.51%	43.27%	-5.44%	12.49%	12.97%

(資料來源：本研究整理)

第四章 研究成果與討論

第一節 研究成果

本研究完成 1/250 縮尺、1/100 縮尺與 1/50 縮尺之 B 地況與 C 地況之擺設方式，與相關流場剖面量測。針對本研究目前完成之成果，茲逐項分述如後：

一、資料蒐集方面

1. 蒐集國內外規範對於地況剖面之相關參數資料、風速剖面之建議值與容許之誤差範圍。
2. 整理入流上游被動設施之相關研究與建議，主要包含三角渦流產生器之尺寸設計方式與地表粗糙元素尺寸與擺設理論。

二、風洞試驗方面

1. 完成 B 地況與 C 地況三種不同縮尺之渦流產生器設計與製作。
2. 完成上述各縮尺地況之剖面量測與確認，更新上游被動設施之尺寸與擺設條件，提供平均風速剖面、紊流強度剖面、積分長度尺度剖面與風速頻譜資料。
3. 由研究過程之試驗結果歸納出地況剖面之調整方式，提供後續若需更改重製風速剖面調整之依據。
4. 測試不同縮尺之流場與不同縮尺模型之影響，以現地試驗資料進行典型位置之壓力數據比對，說明流場縮尺與模型縮尺之正確性與可能造成之誤差成因。
5. 依照前述所有試驗結果，本案檢視各縮尺地況之剖面資料，檢視其橫向均勻性、紊流強度分布與積分尺度等，由第二測試區量測圓盤中心

為原點，將各縮尺地況建議之模型擺設或量測區域列於表 4.1，由試驗結果判斷於該區域內應可保持可靠之風速資訊，若超過該區域則需另確認風速剖面是否符合需求。而模型高度限制則為參考資料，經檢視試驗資料後，若超過該建議高度則其平均風速應仍在範圍內，而紊流強度略為偏低，可能影響試驗結果，但無強制規定僅供參考。

表 4.1 各縮尺地況量測建議範圍 (單位：cm)

	左右量測範圍	前後量測範圍	建議模型高度上限
1/250 C 地況	115	60	70
1/100 C 地況	100	60	50
1/50 C 地況	120	60	120
1/250 B 地況	100	60	110
1/100 B 地況	60	60	120
1/50 B 地況	60	60	120

(資料來源：本研究整理)

第二節 問題檢討與對策

一、風速剖面均勻性

研究中發現文獻中建議之渦流產生器與指數剖面之設計方式，在渦流產生器小於 4 支之情況似乎不完全適用，尤其是 6 倍高度後之剖面均勻性可能不符合預期，需再往上游移動以加大後方混合區域提升均勻性。此造成實驗需大量量測剖面資訊，依試驗結果調整被動設施位置，造成試驗時程增加。但經多次試驗後，已得初步調整經驗，應可減少後續試驗調整時間。

二、風速剖面近地表之調整

在本研究過程中發現，渦流產生器提供整體剖面上半部之幂次分佈，而在剖面近地表下半部分主要仍為地表粗糙元素提供之糙度控制，現今內政部建築研究所之風洞實驗室與設計規劃初期設計製作了單一尺寸之鐵製粗糙元素，其幾何外型尺寸為矩形如圖 3.5 所示，有三種對應上游之投影面積，但

於前人研究中以方型尺寸最為廣泛討論，並存在理論推導與實驗比對資料可供參考，後續可增加地表粗糙元素之尺寸提供剖面細部調整之靈活度。

三、紊流積分長度尺度問題

縱向積分長度尺度常以 Counihan (1967) 提出之經驗公式表示：

$$L_u^x \approx Cz^m$$

其中 C 與 m 為經驗迴歸係數，但於實場量測之結果顯示積分長度尺度存在很高之不確定性，再者，若探討在分離區內之壓力分佈，小尺度渦流攜帶之動量，在分離泡內會促進再接觸現象發生，並強烈地影響分離點周圍之壓力分佈，而此現象與積分尺度並無明顯關聯。另在一般傳統風洞中，難以達成小縮尺之積分尺度模擬，原因為實際現場之尺度太大，於風洞尺寸規模下無法容納大尺度渦流，由於上述原因，於風洞試驗時雖然剖面之紊流強度相等，但其內含之擾動頻率與能量可能不同，也可能不會產生相似之空氣動力學效應，於試驗時需審慎選定風速剖面與分析量測結果。

第五章 結論與建議

第一節 結論

本研究以相關文獻建議式製作渦流產生器與不同地表粗糙元素排列，並進行風洞試驗量測風場剖面數據，結論計有如後 4 項：

- 一、由試驗結果可知，文獻建議之渦流產生器經驗公式，於 6 倍高度後可得相近設計之風速剖面等資料，但仍需進行量測微調，並檢視風速剖面橫向均勻狀況，視量測結果調整渦流產生器之間距與距離。上半部剖面指數可依渦流產生器經驗公式計算，但近地處之風速剖面冪次與地表粗糙元素較相關，試驗應依量測結果調整其排列與改變尺寸，以產生符合設定之剖面，調整原則若需增加底部紊流強度與增加風速虧損，基本上以加密與加大尺寸進行，排列密度與尺寸可依文獻建議公式試算後再行量測調整。
- 二、紊流強度最大值基本上由地表粗糙元素尺寸與排列控制，但於垂直向之紊流強度分佈可藉由加大渦流產生器尺度略為提升。風速頻譜基本上各剖面除近地表面 10 cm 範圍左右後皆近似於 von Karman spectrum 分佈。
- 三、積分尺度剖面，試驗量測值約略介於渦流產生器尺寸之 2 至 3 倍左右，於實驗室中無法完全按照設定比例放大，以現有之實驗設備無法達成 1/100 與 1/50 縮尺之理論縮尺值，後續則不特別調整此參數，但仍將量測結果列於報告內供後續參考。因此，在使用各小縮尺流場時需考量積分尺度可能造成之影響，而文獻(Simiu & Yeo 2019 與 ASCE 49-12)內提及當積分尺度若明顯大於建築特徵長度時，其表面壓力分佈較受流場內小尺度渦流影響，可放寬此模擬條件，在實際應用上，若縮尺建築模型之特徵長度小於紊流長度尺度之 1/3 內時則可使用。
- 四、由不同縮尺地況配合不同縮尺建築物之風洞試驗結果發現，採用比例不正確之模型可能會放大誤差，尤以大縮尺流場配合小縮尺模型(如 1/250

流場與 1/25 模型)最為嚴重，由於其紊流強度分布差異較大，造成壓力擾動偏低進而產生較低之壓力極值，即於實際應用上，可能低估表面最大風壓，因此應盡量採用合乎縮尺比例之來流地況與模型進行試驗。但若無法採用合宜之流場或模型縮尺，則應盡量使平均風速剖面與紊流強度分布符合實際狀況設定，可得相對接近實際狀況之結果。

第二節 建議

根據研究發現，本研究針對風洞實驗室不同縮尺風場之研究，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議、及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：中華民國風工程學會

協辦機關：財團法人台灣建築中心

由試驗結果可提供配合不同尺度之建築物或結構物之風場條件，若需取縮尺模型進行風洞試驗評估時，需謹慎考量風場縮尺問題，包含平均、紊流剖面，以及長度尺度可能造成之效應，建議可由研究成果或其相關文獻建立示範例，以供未來研究或風洞試驗檢測參考使用。

長期性建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：成功大學航太中心風洞實驗室

為保持實驗室風場品質水準，建議定期進行縮尺風場條件檢視，檢視各縮尺流場剖面資訊是否產生變化，或仍有可增進精度之方法進行量測，持續建立實驗室風場條件，除可提供風洞試驗研究優良品質風況外，在相關風洞試驗業務亦可提供多元化之試驗條件，持續保持競爭力。另亦可增加地表粗糙元素之尺寸，可提供更完善之地表粗糙度，將有益於未來剖面微調，使風速剖面製作更有彈性。

參考書目

1. Armitt, J., & Counihan, J. (1968). The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 2(1), 49-71.
2. A.S.C.E. (2012). Wind tunnel testing for buildings and other structures (ASCE/SEI 49-12). American Society of Civil Engineers.
3. A.S.C.E. (2017). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures(ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers.
4. Cochran, L.S., Levitan, M. and Cermak, J.E. (1992). Geometric similitude applied to model and full-scale pressure tap sizes, submitted to 3rd APSWE, also in Papers and Abstracts of CSU/TTU CPWE.
5. Counihan, J. (1967). Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880–1972. *Atmospheric Environment*, 9(10): p. 871-905.
6. Counihan, J. (1969). An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 3(2), 197IN1201-1200IN2214.
7. Counihan, J. (1971). Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements. *Atmospheric Environment*, 5(8), 637-642.
8. Counihan, J. (1973). Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment*, 7(7), 673-689.
9. Cook, N. (1978). Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 3(2-3), 157-176.
10. Davenport, A.G. (1967) The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading. in *International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures*.
11. Gartshore, I. and K. De Croos (1977), Roughness element geometry required for wind tunnel simulations of the atmospheric wind. *Journal of Fluids Engineering*, 99(3), 480-485.
12. Irwin, H. (1981). The design of spires for wind simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(3), 361-366.
13. Jensen, M. (1958), The model-law for phenomena in natural wind. *Ingenioren*, 2(2), 121-128.

14. Jia, Y., B. Sill, and T. (1998) Reinhold, Effects of surface roughness element spacing on boundary-layer velocity profile parameters. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 73(3), 215-230.
15. Levitan, M.L., Mehta, K.C. and Vann, W.P. (1991). Field measurements of pressures on the Texas Tech building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38(2-3): p. 227-234.
16. Lin, J.-X., Surry, D. and Tieleman, H. (1995). The distribution of pressure near roof corners of flat roof low buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 56(2-3): p. 235-265.
17. Mehta, K.C., Levitan, M. L., Iverson, R. E. and McDonalde, J. R. (1992). Roof corner pressures measured in the field on a low building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41(1-3): p. 181-192.
18. Peterka, J. A., & Cermak, J. E. (1974). Simulation of atmospheric flows in short wind tunnel test sections. *CER*; 73/74-32.
19. Simiu, E. and Yeo, D. (2019). *Wind effects on structures: Modern structural design for wind*. John Wiley & Sons.
20. Standen, N. (1972). A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels: National Aeronautical Establishment, Low Speed Aerodynamics Section.
21. Tieleman, H., Surry, D. and Mehta, K. (1996). Full/model-scale comparison of surface pressures on the Texas Tech experimental building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 61(1): p. 1-23.
22. Wooding, R., Bradley, E. F., & Marshall, J. (1973). Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary-Layer Meteorology*, 5(3), 285-308.
23. 「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，2006，台灣。

附錄一 採購評選意見與回應

採購評選會議委員意見回應

項次	評選委員意見	回覆
1	研究內容為何僅著重於市郊與開闊地況？若針對都市內微型氣候因廣域及近域風場差異，市區內會有較大之氣流擾動，是否亦需較大縮尺的A地況以進行試驗。	本案著重於建立較小縮尺比例之風場地況條件，台灣大多數皆為地況B與C之條件，考量計畫時間期程之狀況，先以此二地況進行。而若要觀察大範圍之氣流擾動，則以現有1/250 縮尺條件進行應已足夠。
2	近年政府大量鼓勵於屋頂設置太陽能板及海上風機，本案研究內容上是否可應用於此方面。	一般常見之大型風機離地高度約為 60 至 100 公尺上下，以現有之 1/250 縮尺後，模型尺寸約為 24 至 40 公分，而單片太陽能板僅剩數公分，若要進行較細部之試驗量測，則較大的模型比例有助於提升試驗精度，本案建立之風場條件皆可應用於需較小縮尺比例之試驗。
3	本研究以不同縮尺流場之地況模擬為主，以建研所現有 1/250 縮尺 A、B、C 等 3 種地況為基礎，並建立 1/50 及 1/100 縮尺地況。服務建議書內有敘明後續會建立本所風洞實驗室之地況資料庫，此資料庫包含內容為何，後續可有擴充空間？	資料庫內容即為所建立之地況參數，如渦流產生器尺寸、設置位置與地表粗糙元素之尺寸排列等，以及依此條件進行量測之平均風速、擾動風速、紊流積分尺度與風頻譜等資料，後續若建立其他條件之地況資料皆可納入其中。

4	研究團隊中是否有本研究之全職員工？如有，月薪資是否達3萬元以上？	本計畫人員皆為兼職人員。
5	本案之創意或自由回饋項目請補充說明。	本案以完善實驗室風場試驗條件為主進行，望可提升實驗室試驗能量，並供未來試驗檢測之用。
6	服務建議書中工作排程為11個月，如何因應現況修正？	本計畫有兩位全職博士參與進行，現正進行回顧相關文獻、渦流產生器尺寸設計以及試驗流程規劃，本團隊人員於建研所風洞實驗室參與研究案與檢測案經驗豐富，對於設備熟悉度高，且辦公室位於同一校地，期程縮短之狀況將調整試驗時間加速進行，本案可配合契約書內要求之期中、期末報告等時程。
7	本案擬額外建立1/50及1/100縮尺之地況，如更小的縮尺如1/25是否可行？縮尺比例選定之基準為何，請說明。	若縮尺在1/25，則要形成該風速剖面所需之之地面糙度需再提升，即地表粗糙元素尺寸可能過大且調整範圍有限，而若更小縮尺比例如1/10或更低等尺寸，由於平均風剖面變化在此範圍內較不明顯，一般會以該處相對應之均勻紊流場進行風洞試驗，因此本案縮尺選定為1/50與1/100。
8	研究中地況目前選定市郊(B地況)及開闊區域(C地況)，在目前政府推動都市屋頂種電，廣設太陽能光電板情況下，不對都市內區域(A地況)進行其他縮尺模擬是否適當？	本案著重於建立較小縮尺比例之風場地況條件，台灣大多數皆為地況B與C之條件，考量計畫時間期程之狀況，先以此二地況進行。

9	關於 A、B 及 C 等 3 種地況詳細定義為何？可有較精確及直覺的分類方式，以免令人誤解或混淆。	地況分類定義係參考建築物耐風設計規範與解說內定義： 地況 A：大城市市中心區，至少有 50% 之建築物高度大於 20 公尺者。建築物迎風向之前方至少 800 公尺或建築物高度 10 倍的範圍（兩者取大值）係屬此種條件下，才可使用地況 A。 地況 B：大城市市郊、小市鎮或有許多像民舍高度（10~20 公尺），或較民舍為高之障礙物分布其間之地區者。建築物迎風向之前方至少 500 公尺或建築物高度 10 倍的範圍（兩者取大值）係屬此種條件下，方可使用地況 B。 地況 C：平坦開闊之地面或草原或海岸或湖岸地區，其零星座落之障礙物高度小於 10 公尺者。 實際上需至現地調查待測物或建築周邊環境後，依上敘述決定。
10	縮尺模型進行風洞試驗與真實建物差異程度？是否有可用之前提？	於風洞進行縮尺模型試驗須遵守幾何相似、運動相似與動力相似條件，而在來流部分，除了平均與擾動風速剖面、紊流積分尺度與頻譜能量分布皆需符合縮尺外，若為非曲面之鈍體，則雷諾數需達 10^5 以上以避免產生雷諾數效應，滿足上述條件後才可透過相似律換算為實際受力。

11	此項研究應於實驗室當初規劃時一併納入，而現今新增對本所實驗室亦有幫助，期許計畫完成後對實驗室營運多有助益。	感謝委員肯定。
12	此項研究對於都市規劃方面，如環評、都市計畫及都市設計方面是否有助益，此方面之需求為何？風洞試驗尺度該如何決定，規格方面是否有要求。	風洞縮尺模型需配合相對應風場條件才可正確反應出實尺寸建築或結構之受風效應，除需滿足高雷諾數條件外，平均速度剖面、紊流剖面、積分尺度與頻譜特性等皆須配合縮尺比例，而試驗尺度需依照風洞、主建物尺寸等條件尋求平衡點決定。以都市建物而言，一般各國實驗室縮尺約落於 1/200 至 1/500 之間。

附錄二 期中審查意見與回應

期中審查會議委員意見回應

審查委員意見 (依發問順序)	研究團隊回應
一、張景鐘委員	
1. 本研究成果對建研所風洞實驗室進行各種縮尺模型試驗有很大幫助。	感謝委員肯定。
2. 1/100 縮尺 C 地況參數與測試結果缺失 case2 與 3？各 case 代碼代表之狀況應整理列出，使問題較為清楚。	將依委員意見於期末報告內將各 case 案例與其排列條件、統計數據列出以供參考。
3. 試驗結果以 case15 最符合 C 地況設定，以 α 值為主要指標，建議以平均值外也列出標準差；第二指標為何？	標準差將於期末報告內增加列出，第二指標考量影響程度，以紊流強度為主。
二、蕭葆義委員	
1. 期末建議確認模擬的大氣邊界層速度剖面是否為完全發展，確認前後剖面差異。	將依委員意見，於後續試驗進行量測前後剖面差異。
2. 建議確認在量測區域之是否存在壓力梯度，以避免流場出現加減速問題。	將依委員意見，於後續試驗進行量測並檢視縱向壓力梯度分布狀況。
三、方富民委員	
1. 歸仁風洞已使用多年，其來風場情況確實需要確認。本研究之執行除了可以檢核本風洞之風況品質外，亦能增進本設施之應用範疇，故有具體且實質之貢獻。	感謝委員肯定。

2. 本風洞第二測試區之測試段中既有之移動天車尺寸不可忽視，有影響風況品質之虞，未來可以考慮評估其存在之價值。	後續將視研究量測範圍檢視是否對於剖面產生影響。
3. (2-8) 式有誤，請修正。	已修正公式。
4. 在製造不同比例尺之風速剖面時應注意其縱向之穩定性。	將依委員意見，於後續試驗進行量測並檢視縱向剖面與壓力梯度分布狀況。
四、黃朝揚委員	
1. 太陽光電系統遠小於建築尺寸，提高縮尺比例有助解析局部風壓之能力。	感謝委員肯定。
2. 本研究建立新尺度配置，結果顯示良好一致性，對後續風洞試驗很有幫助。	感謝委員肯定。
3. 建議定義風洞試驗後之剖面參數。	依照委員意見，所有量測剖面最終之剖面參數都將於後續研究結果列表呈現。
五、揚宏宇委員	
1. 達到預期目標值得肯定。	感謝委員肯定。
2. 對於不同地況粗糙度是否考慮配合實際建築配置與分佈，才能反應實際狀況？	研究僅依照規範與文獻建議之剖面設定與量測，實際應用若存在建築或地形，則需將其物體縮尺製作，並擺置於對應位置以模擬其對環境風之影響。
3. power law 之指數對於空曠區域模擬較佳，若為複雜地形影響，則需要注意其是否適用或需進行適當修正。	同 2 回應，若為複雜地形需將地形變化納入考量，並進行重新量測。
六、風工程學會	
1. 達預期目標，可強化實驗室基	感謝委員肯定。

本性能，完整建置風場資料，值得肯定。	
2. 除 ESDU 資料外，可蒐集其他國家規範納入參考，明確定義出目標模擬。	由於各國規範標準略有差異，包含邊界層高度、剖面 α 值、粗糙長度等皆有差異，目前以 ESDU 資料較為完整，因此取其為參考值，其他國家之規範後續將蒐集評估後決定是否納入考量。
3. 量測時間與採樣頻率為何？風速頻譜計算時是否取窗函數進行？	試驗時間為 128 秒，取樣頻率訂為 256Hz；頻譜計算採以分段平均作法進行，無另外加入窗函數。
4. 紊流強度隨高速增加快速衰減，如何改善？	後續將分別以加大渦流產生器與地表粗糙元素尺寸方式進行測試，應可達某程度改善。
5. 期待本計畫可規劃建置便捷安裝系統與安裝說明。	試驗內容包含之渦流產生器與地表排列方式將重新製作供後續使用。
七、建築師公會	
1. 增加地況都市微氣候有助益，高樓規模對周遭環境是否產生影響？	感謝委員肯定，建築是否產生影響需依該建物量體尺寸與所處位置進行試驗評估。
八、結構技師公會	
2. 地況分級僅三級，差距很大，可增加種類數？	目前僅先以規範內定義之三種地況為主探討，其他試驗量測之數據皆將列於期末報告內供參考。

附錄三 第一次專家座談會意見與回應

內政部建築研究所 109 年度協同研究案

「風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究」

第一次專家座談會議 簽到單

時間：109 年 8 月 27 日(星期四)上午 10 時 00 分

地點：內政部建築研究所-討論室(一)

主持人：陳組長建忠



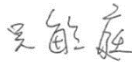
中興大學 土木工程系

方富民教授



成功大學 工程科學系

吳毓庭教授



建國科技大學 空間設計系

陳若華教授



臺灣海洋大學 河海工程系

張景鐘教授



臺灣科技大學 建築科技中心

黎益肇教授

成功大學 航太中心：



內政部建築研究所：



第一次專家座談會議委員意見回應

審查委員意見 (依發問順序)	研究團隊回應
一、吳毓庭委員	
1. 可檢視 momentum flux ($u'w'$) 數值是否合理，因能量會由高處往低處傳遞，理論上該數值應為負值。	感謝委員建議，後續試驗亦將檢視其結果。
2. 紊流強度分佈與摩擦速度比值之平方，在平衡之紊流邊界層中約會等於 7。	感謝委員建議，後續試驗亦將檢視其結果。
3. 近地表之風頻譜結果不符合 von karman 形式應為合理狀況，因其渦流尺度遭到地面限制，無法自由發展。	感謝委員說明。
二、陳若華委員	
1. 本研究為部分邊界層模擬，是否考慮以 Cook 所提出之尺度因子 S 進行計算縮尺比例？	於研究初期蒐集文獻時注意到尺度因子之相關研究，本案沒有採用之原因為其計算公式內，將紊流積分尺度做為變數輸入，但於研究中發現在風洞尺度內，並無法滿足積分尺度之縮尺，因此僅由剖面數據判斷是否符合縮尺比例，但於採用前仍須謹慎評估。
2. 圓盤周圍是否也鋪設地表粗糙元素？	考量圓盤周圍 1.6m 內可能擺設其他試驗物件，與保留流經地況擺設之流場混合之空間，不在渠區域內鋪設。
三、張景鐘委員	
1. 渦流產生器之間距與距離配置對於剖面 α 值與紊流強度之影響宜定義各案例之擺設後	感謝委員建議，將於期末報告中修正與重新整理資料，使其呈現

說明較為清楚。	更為明確。
四、方富民委員	
1. 渦流產生器之存在應製造出約略之平均剖面，而主要紊流強度分佈應為地表粗糙度所造成。	感謝委員說明，於試驗過程中發現確實渦流產生器製造了大部分之平均風速剖面，而近地面之剖面與紊流強度與地表粗糙元素相關，越為粗糙與密集則速度虧損與擾動皆越大。
2. 邊界層厚度如何決定？	試驗中以剖面反推而得，由於在各比例下之平均風速應皆遵循指數律分佈，而紊流強度則隨縮尺比例越小而分佈越高，試驗同時比對平均與擾動分佈以確認符合設定比例。

附錄四 期末審查意見與回應

期末審查會議委員意見回應

審查委員意見 (依發問順序)	研究團隊回應
一、風工程學會	
1. 本研究成果對建研所風洞試驗能量有很大幫助。	感謝委員肯定。
2. 重要發現中提及近地表剖面需調整地表粗糙元尺寸與排列，建議列出調整原則。	將於報告書內說明。
3. 重要發現中提及積分長度尺度對一般構造物影響不顯著，應釐清一般構造物之定義。	一般建築物指 50 公尺以下，且垮度不大於 50 公尺為之。於文獻內提及積分尺度若明顯大於建築特徵長度時(一般為 3 倍以上)，其表面壓力分佈較受流場內小尺度渦流影響，可放寬長度尺度相似之模擬條件。
二、方富民委員	
1. 本研究針對建研所風洞之來流風況作了一系列詳盡的檢視，進而增進了小縮尺模型試驗的來流試驗範圍，對本風洞設施的試驗品質與功能性皆具貢獻。	感謝委員肯定。
2. 本計畫成果之圖檔與必要之資料應作妥善留存，以供爾後風	最終調整出之縮尺剖面資料與圖檔將收錄於資料分析光碟內供未來使用參考。

洞試驗研究之重要佐証。	
3. 以人為方式於有限距離內製成之來流風況一般都具有較高之不穩定性，在 1/100 與 1/50 的 B 地況情形中，圖 3.37 與 3.41 皆顯示風速剖面在縱向(或/與橫向)上有相當之差異，建議在第五章結論中予以敘明。	由於渦流產生器尺寸較大且支數降低，在風洞邊壁處無法設置，出現較明顯之不對稱性，造成橫向剖面均勻性較差，該剖面差異亦使該地況模型建議擺設範圍較小。
4. 為何 1/100 之 C 地況紊流強度剖面偏低？	在調整過程中無法調整出適當剖面，因此該地況模型建議設置範圍較小，後續可重新進行試驗調整。
三、吳毓庭委員	
1. 本案達成目標，並完善回答期中審查意見與問題。	感謝委員肯定。
2. 本研究之成果未來可供使用者快速知悉入流之風速剖面。	感謝委員肯定。
3. 本研究未來應考量加入數值模擬，與風洞試驗量測結果進行驗證。	本研究之風洞試驗結果可作為未來率定風場數值模式之比對資料。
四、張景鐘委員	
1. 研究成果符合預期需求，提供各縮尺地況來流剖面與量測建議範圍，對實驗室應用相當有價值。	感謝委員肯定。
2. 所有實驗案例擺設條件、尺寸說明列於附錄四內，應於本文中提及引用和說明。	將依委員意見於本文 30 頁處增加說明。

3. 表 A.1 各渦流產生器尺寸表之幾何尺寸應標示對應代碼。	將依委員意見於附錄六修改。
4. 各案例之量測資料統整於附錄五中，建議於報告本文內提及和說明。	將依委員意見於本文 30 頁處增加說明。
五、楊宏宇委員	
1. 文中 TTU 試驗之地況條件，配合上不同縮尺之風速剖面與風壓試驗結果應說明其可能成因。	成因可能為紊流強度剖面在垂直向之差異，TTU 試驗中，相同角隅位置在低紊流強度下將產生較大之平均負風壓與較低之擾動風壓。
2. 為何僅採 B、C 地況進行研究可於文中加以說明。	將依委員意見於本文說明修改。台灣地區除大都市中心外，基本上仍以 B、C 地況居多，且若介於 A、B 之間一般仍以保守估計之 B 地況進行，為本案主要選擇原因。

附錄五 第二次專家座談會意見與回應

內政部建築研究所 109 年度協同研究案

「風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究」

第二次專家座談會議 簽到單

時間：109 年 11 月 30 日(星期一)上午 10 時 00 分

地點：內政部建築研究所-風雨風洞實驗室

主持人：李主任鎮宏

李鎮宏

中興大學 土木工程系

方富民教授

方富民

宏華營造工程公司

杜振宗高級顧問

天珩工程顧問公司

黃武龍負責人

黃武龍

祺昌工程科技公司

傅仲麟總經理

傅仲麟

臺灣科技大學 建築科技中心

黎益肇教授

黎益肇

台北科技大學 土木工程系

羅元隆教授

羅元隆

成功大學 航太中心：

饒光民 周育武 魏政洋

內政部建築研究所：

郭建源 張漢喻 林元智

第二次專家座談會議委員意見回應

審查委員意見 (依發問順序)	研究團隊回應
一、黃武龍委員	
1. 風洞試驗結果與法規規定之試驗值常有落差，在實務使用上該如何正確採用風洞試驗結果，以避免出現過度保守設計結果？	在經濟或安全性考量下，常進行風洞試驗以求得較接近實際狀況之受風力，在規劃正確並遵循縮尺條件下進行之風洞試驗結果應具一定之參考價值，但若待測建築物是因遮蔽環境產生較低之風力，在考量遮蔽效應未來可能消失時，則以不低於規範計算之80%為宜。
二、傅仲麟委員	
1. 在部分邊界層模擬中應盡量達到穩定發展狀況，即鋪設地表粗糙元素之範圍需足夠長度，在本案之模擬狀況之鋪設範圍是否足夠？	本案以渦流產生器為基準長度，除C地況1/250外為7倍左右，其餘範圍落於7.3至9.5倍內，實際鋪設長度約為10至20公尺以上，應已滿足需求。
2. 紊流剖面變化較為線性，與參考規範設定值形狀稍有落差之成因為何？	成因可能為近地表紊流強度較低，在粗糙元鋪設位置結束處與量測處約留有2公尺段差，為保留實際裝設之旋轉圓盤內範圍以供安裝周遭模型所導致，但其紊流強度仍落於設定範圍區間。
3. 實場近地處積分長度尺度約在150至200公尺上下，以建築研究所現有風洞最大可產生之積分尺度應已達上限。	誠如委員所述，在1/250縮尺地況模擬之長度尺度在近地表處尚為符合需求，但於更小縮尺之1/100與1/50縮尺下已無法完全

	按照比例縮尺，在使用上須特別注意。
4. TTU 比對模型結果之差異成因為何？可考慮比較所有風向之最大誤差。	成因可能為紊流強度剖面在垂直向之差異，TTU 試驗中，相同角隅位置在低紊流強度下將產生較大之平均負風壓與較低之擾動風壓。感謝委員意見，後續延伸之研究會重新討論誤差估算方式。
三、黎益肇委員	
1. 建議詳列各縮尺地況之排列形式。	感謝委員建議，將於期末報告中修正與重新整理資料，使其呈現更為明確。
2. 可將粗糙元排列以輕質材料製作為模組化組件以增加試驗速度。	本案時程與經費已不足以進行後續製作，但若所內有需求，可配合協助執行相關組件之設計與製作。
3. 除了 B 地況與 C 地況外，是否考慮增加中間過渡地況以更完善各種來流條件？	本案所有試驗資料已統整於附錄，未來可依需求搜尋較相近之剖面或由其為基底進行調整使用。
4. 除了主流向之外，在橫風向與垂直向是否也有量測資料？	最終之三組縮尺地況之相關試驗資料將附於資料光碟內以供參考。
四、羅元隆委員	
1. 在剖面比對可參考 2019 年新版紐澳規範。	感謝委員提供資訊，後續延伸之研究將納入參考比對。
2. 由 TTU 風壓係數結果如何說明縮尺影響與風壓修正參數？建議在壓力比對方面可考慮選用高層建築，可看出高度變化。	由試驗結果並不能直接定義出不同縮尺之風壓修正方式，僅能說明選用錯誤縮尺模型可能產生之風壓誤差。目前選用 TTU 模型原因為資料較為齊全，後續延伸研

	究可考慮納入高層建築，檢視高程變化之影響。
3. 風壓係數如何計算？最大值計算方式？	將試驗資料分段進行，將量測風壓除各段平均之風速壓得風壓係數(建築高程)，將各段資料之最大風壓值選出前 5 大並平均得之。
4. 本案建立出很多流場資料，可以供以後參考，國外風洞實驗室都有類似資料。	感謝委員肯定。
五、方富民委員	
1. 在模擬部分邊界層時，風洞之阻塞比約為多少？	最大尺寸之渦流產生器約佔 30%，但其離量測處超過 25 公尺，由縱向壓力梯度結果亦說明於量測處並無明顯壓力梯度出現，應已遠離上游渦流產生器產生之加速區域。
2. 有考慮加阻牆參數？	在部分試驗中有增加阻牆，但有阻牆之狀況下紊流強度並無太明顯變化，平均剖面在下部虧損略微提升。
3. 收縮段與測試段間溝槽與移動機構是否影響風場？	兩段中間之溝槽已補平應無影響；另舊移動機構已拆除，僅留下軌道加設新三維移動機構，影響範圍在風洞兩側軌道周圍 60 公分左右，對中心量測區域無太大影響。

附錄六 各案例之試驗擺設條件

1. 渦流產生器尺寸定義

渦流產生器以三角形或梯形為主要形狀，在部分個案中於底部額外裝設擋板以增加地面速度虧損，尺寸如圖 A.1 所示，而各渦流產生器之尺寸列於表 A.1。排列位置參照圖 3.8 與圖 3.10。

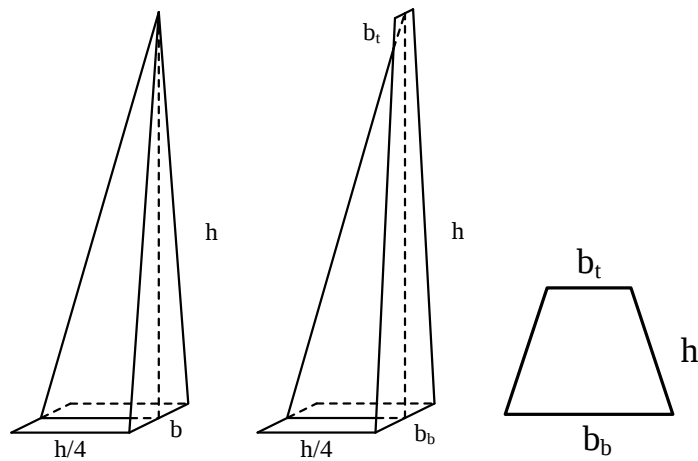


圖 A.1 三角形、梯形渦流產生器與底部擋板尺寸示意

表 A.1 各渦流產生器尺寸表

	幾何形式	高 h (cm)	底寬 b_b (cm)	頂寬 b_t (cm)
spire01	三角形	155	16.5	-
spire02	三角形	239	26.1	-
spire03	梯形	239	36.1	10
spire04	三角形	198	30	-
spire05	梯形	258	30	10
spire06	梯形	258	50	20
spire07	梯形	258	60	20
spire08	梯形	258	60	10
bd1	梯形	90	120	40
bd2	梯形	90	90	40
bd3	梯形	90	60	40
bd4	梯形	90	110	40

2. 地表粗糙元素尺寸定義

地表粗糙元素尺寸如圖 3.5 與圖 3.7 所示，而由於原粗糙元素三方向尺寸不同，定義 rn01 為最大面在底部且長邊垂直於上游方向、rn02 為最小面在底部且最大面朝向上游方向。而新製之粗糙元素 rn03 為最大面積朝向上游方向。在排列範圍部分同樣依照圖 3.8 之示意，起始點皆為測試區中心往上游 1.6m 處，最靠後端 2m 皆為 rn1 排列並鋪設地毯，若有混合粗糙元素之狀況，則另標註前後順序。

表 A.1 各渦流產生器尺寸表

	渦流產生器				地表粗糙元素	
case index	形式	SPD (cm)	SP	數量	形式	RR
01	spire01	77	6.25	5	rn01	720
02	spire01	77	6.25	5	rn02	720
03	-					
04	spire02	133	5.9	3	rn01	1120
05	spire02	110	5.9	3	rn01	1120
06	spire02	110	6.9	3	rn01	1120
07	spire02	110	6.9	3	rn01	1360
08	spire02	100	6.9	3	rn01	1360
09	spire03	100	6.9	3	rn01	1360
10	spire03	110	6.9	3	rn01	1360
11	spire02	100	6.9	4	rn01	1360
12	spire02	90	6.9	4	rn01	1360
13	spire02	90	7.9	4	rn01	1360
14	spire02	90	7.9	4	rn01	1600
15	spire02	100	7.9	4	rn01	1600
16	spire04	80	6.5	4	rn01	1040
17	spire04	80	7.5	4	rn01	1240
18	spire04+ 20cm 阻牆 at 720	80	7.5	4	rn01	1160
19	spire04+ 20cm 阻牆 at 800	80	7.5	4	rn01	1080

表 A.1 各渦流產生器尺寸表(續)

	渦流產生器				地表粗糙元素	
case index	形式	SPD (cm)	SP	數量	形式	RR
20	spire02	100	7.9	4	rn01 rn02	前 1160 後 200
21	spire02	100	7.9	4	rn01 rn02	前 920 後 440
22	spire02	100	7.9	4	rn01 rn02	前 680 後 680
23	spire02	100	7.9	4	rn01 rn02 rn01	前 680 中 440 後 240
24	spire02	100	7.9	4	rn02	1600
25	spire02	100	7.9	3	rn02	1600
26	spire05	120	7.3	3	rn01	1600
27	spire06	120	7.3	3	rn01	1600
28	spire07	120	7.3	3	rn01	1600
29	spire07+bd1	120	7.3	3	rn01	1600
30	spire07+bd2	120	7.3	3	rn01	1600
31	spire04	100	9.5	4	rn01	1600
32	spire04+bd3	100	9.5	4	rn01	1600
33	spire04	80	7.5	4	rn02	1240
34	spire04	90	7.5	4	rn02	1240
35	spire04	100	7.5	4	rn02	1240
36	spire04	100	8.5	4	rn02	1440
37	spire04	90	8.5	4	rn02	1440
38	spire04	80	8.5	4	rn02	1440
39	spire04	80	9.5	4	rn02	1640
40	spire04	90	9.5	4	rn02	1640
41	spire04	100	9.5	4	rn02	1640

表 A.1 各渦流產生器尺寸表(續)

case index	渦流產生器				地表粗糙元素	
	形式	SPD (cm)	SP	數量	形式	RR
42	spire08	120	7.3	3	rn02	1640
43	spire08+bd4	120	7.3	3	rn02	1640
44	spire08	120	9.5	3	rn02	1960
45	spire08+ 35cm 阻牆 at 0	120	9.5	3	rn02	1840
46	spire08+ 35cm 阻牆 at 0	120	9.5	3	rn03 rn02	前 720 後 1120
47	spire08+ 35cm 阻牆 at 0	120	9.5	3	rn03	1840
48	spire08+ 35cm 阻牆 at 0	120	9.5	3	rn03 rn02	前 1120 後 720
49	spire08	120	9.5	3	rn03 rn02	前 1120 後 720

附錄七 各案例之量測資料統整表

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
01	A	1.51%	0.154	0.016	0.349	0.291	14.33%	8.88%
	B	-1.43%	0.140		0.290	0.257	14.14%	8.72%
	C	1.98%	0.154		0.317	0.262	14.56%	8.61%
	D	1.67%	0.118		0.274	0.240	14.65%	8.33%
	AF	1.50%	0.161		0.308	0.269	15.86%	9.73%
	AB	-1.42%	0.159		0.345	0.282	13.35%	7.75%
平均值		1.59%	0.148		0.314	0.267	14.48%	8.67%
02	A	-1.88%	0.167	0.010	0.337	0.285	15.09%	9.31%
	B	-1.15%	0.144		0.303	0.262	14.03%	8.77%
	C	1.69%	0.160		0.304	0.240	14.93%	7.61%
平均值		0.94%	0.157		0.314	0.262	14.68%	8.56%
04	A	-0.70%	0.158	0.032	0.459	0.385	15.85%	10.23%
	B	3.53%	0.101		0.403	0.358	14.21%	9.32%
	C	4.57%	0.106		0.473	0.387	14.41%	9.24%
平均值		1.76%	0.122		0.445	0.377	14.82%	9.60%
05	A	-2.23%	0.171	0.032	0.484	0.419	15.29%	10.20%
	B	2.56%	0.115		0.440	0.383	14.14%	9.43%
	C	3.01%	0.116		0.452	0.377	14.99%	9.23%
平均值		1.56%	0.134		0.459	0.393	14.81%	9.62%
06	A	-1.23%	0.162	0.028	0.496	0.424	14.61%	8.69%
	B	3.87%	0.110		0.474	0.403	13.17%	7.86%
	C	3.07%	0.120		0.490	0.386	13.70%	7.58%
平均值		1.63%	0.131		0.487	0.404	13.83%	8.04%

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
07	A	-1.87%	0.171	0.027	0.555	0.455	15.20%	9.18%
	B	2.32%	0.115		0.470	0.400	14.39%	8.61%
	C	2.78%	0.116		0.529	0.408	15.16%	8.51%
平均值		1.39%	0.134		0.518	0.421	14.92%	8.77%
08	A	-2.45%	0.175	0.029	0.488	0.430	15.80%	9.42%
	B	1.86%	0.126		0.490	0.408	14.67%	8.66%
	C	2.15%	0.124		0.497	0.407	15.05%	8.41%
平均值		1.29%	0.142		0.492	0.415	15.17%	8.83%
09	A	-3.31%	0.180	0.004	0.560	0.535	14.66%	11.17%
	B	-3.29%	0.182		0.627	0.596	14.92%	11.24%
	C	-2.52%	0.174		0.644	0.581	15.21%	10.78%
平均值		1.82%	0.179		0.610	0.570	14.93%	11.06%
10	A	-3.64%	0.179	0.009	0.590	0.549	14.78%	10.96%
	B	-1.72%	0.163		0.610	0.587	14.22%	10.72%
	C	-1.69%	0.164		0.600	0.547	14.81%	10.40%
平均值		1.41%	0.169		0.600	0.561	14.60%	10.69%
11	A	-0.57%	0.153	0.019	0.455	0.408	14.66%	9.34%
	B	-2.49%	0.174		0.525	0.453	15.04%	9.35%
	C	1.08%	0.137		0.450	0.386	14.94%	8.73%
平均值		0.83%	0.155		0.476	0.416	14.88%	9.14%
12	A	-2.10%	0.171	0.019	0.509	0.458	14.90%	9.39%
	B	-3.01%	0.177		0.616	0.523	14.01%	9.03%
	C	0.62%	0.140		0.480	0.430	13.58%	8.37%
平均值		1.15%	0.162		0.535	0.470	14.16%	8.93%

附錄七 各案例之量測資料統整表

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
13	A	-0.66%	0.157	0.014	0.541	0.500	14.63%	9.04%
	B	-2.58%	0.177		0.586	0.515	14.93%	9.23%
	C	-0.32%	0.150		0.549	0.476	14.75%	8.70%
平均值		0.71%	0.161		0.559	0.497	14.77%	8.99%
14	A	-1.35%	0.166	0.012	0.572	0.515	15.10%	9.39%
	B	-3.28%	0.180		0.603	0.540	15.27%	9.53%
	C	-0.56%	0.156		0.498	0.451	14.69%	8.77%
平均值		1.04%	0.167		0.558	0.502	15.02%	9.23%
15	A	0.51%	0.142	0.014	0.585	0.496	14.88%	9.02%
	B	-1.90%	0.167		0.575	0.512	15.05%	9.08%
	C	0.82%	0.139		0.537	0.449	14.63%	8.63%
	AF	-1.94%	0.162		0.574	0.502	16.30%	9.82%
	AB	-3.19%	0.170		0.543	0.481	15.08%	9.39%
平均值		1.67%	0.156		0.563	0.488	15.19%	9.19%
16	A	-1.59%	0.247	0.026	0.493	0.451	15.59%	11.10%
	B	1.68%	0.234		0.491	0.460	14.39%	10.22%
	C	3.57%	0.196		0.522	0.462	16.62%	10.59%
平均值		1.37%	0.226		0.502	0.458	15.53%	10.63%
17	A	-1.36%	0.249	0.035	0.521	0.475	17.03%	11.29%
	B	1.55%	0.226		0.537	0.497	16.52%	10.56%
	C	4.90%	0.180		0.523	0.485	16.24%	9.96%
平均值		1.56%	0.218		0.527	0.486	16.60%	10.60%
18	A	-2.80%	0.260	0.021	0.535	0.524	15.95%	11.33%
	B	-2.94%	0.245		0.531	0.484	15.00%	10.55%
	C	2.08%	0.218		0.520	0.488	16.33%	10.80%
平均值		1.56%	0.241		0.529	0.499	15.76%	10.89%

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
19	A	-2.09%	0.254	0.032	0.528	0.499	17.17%	12.01%
	B	-2.22%	0.250		0.551	0.516	17.52%	11.60%
	C	3.67%	0.196		0.598	0.547	17.59%	11.04%
平均值		1.60%	0.233		0.559	0.521	17.43%	11.55%
20	A	-2.10%	0.176	0.018	0.530	0.472	16.81%	10.05%
	B	-2.68%	0.180		0.606	0.517	15.23%	9.37%
	C	0.88%	0.147		0.545	0.467	14.42%	8.55%
平均值		1.13%	0.167		0.560	0.485	15.49%	9.33%
21	A	-2.82%	0.184	0.025	0.612	0.508	17.07%	10.45%
	B	-5.09%	0.215		0.583	0.501	17.69%	10.62%
	C	-1.58%	0.164		0.545	0.454	16.73%	9.74%
平均值		1.90%	0.188		0.580	0.488	17.16%	10.27%
22	A	-3.63%	0.195	0.024	0.656	0.537	17.25%	10.74%
	B	-4.71%	0.211		0.620	0.517	16.88%	10.47%
	C	-1.37%	0.164		0.563	0.469	15.66%	9.33%
平均值		1.94%	0.190		0.613	0.508	16.60%	10.18%
23	A	-2.31%	0.176	0.033	0.526	0.442	16.24%	10.27%
	B	-4.86%	0.210		0.615	0.513	16.49%	10.33%
	C	0.96%	0.144		0.585	0.483	13.88%	8.48%
平均值		1.63%	0.177		0.575	0.479	15.54%	9.69%
24	A	-4.68%	0.198	0.016	0.621	0.526	18.03%	11.33%
	B	-6.36%	0.211		0.596	0.520	17.61%	11.37%
	C	-2.70%	0.178		0.556	0.471	16.81%	10.40%
平均值		2.75%	0.196		0.591	0.506	17.48%	11.04%

附錄七 各案例之量測資料統整表

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
25	A	-6.17%	0.207	0.034	0.581	0.500	17.21%	11.26%
	B	1.45%	0.140		0.551	0.475	15.43%	9.73%
	C	1.71%	0.164		0.590	0.475	17.25%	10.62%
平均值		1.87%	0.170		0.574	0.483	16.63%	10.53%
26	A	1.82%	0.119	0.007	0.544	0.489	15.59%	9.24%
	B	2.02%	0.105		0.512	0.443	15.03%	9.02%
	C	2.75%	0.109		0.524	0.428	15.37%	8.93%
平均值		1.32%	0.111		0.527	0.453	15.33%	9.06%
27	A	2.49%	0.108	0.003	0.684	0.616	16.68%	11.71%
	B	-1.93%	0.109		0.665	0.646	17.71%	12.02%
	C	2.84%	0.113		0.604	0.585	17.37%	11.78%
平均值		1.45%	0.110		0.651	0.616	17.25%	11.83%
28	A	1.98%	0.112	0.006	0.708	0.713	17.50%	13.28%
	B	0.93%	0.105		0.615	0.621	17.38%	12.88%
	C	2.01%	0.100		0.588	0.648	17.07%	12.98%
平均值		0.98%	0.106		0.637	0.661	17.32%	13.05%
29	A	-3.02%	0.135	-	-	-	21.32%	20.52%
30	A	3.17%	0.123	0.012	0.781	0.762	17.36%	14.70%
	B	2.90%	0.130		0.690	0.720	17.92%	14.72%
	C	1.66%	0.150		0.775	0.813	17.19%	14.15%
	AF	-1.37%	0.147		0.711	0.728	21.31%	16.58%
	AB	2.56%	0.131		0.733	0.714	18.31%	15.43%
平均值		2.33%	0.136		0.738	0.747	18.42%	15.12%

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
31	A	-2.08%	0.184	-	-	-	16.16%	10.04%
32	A	5.55%	0.207	0.022	0.702	0.687	17.21%	12.96%
	B	-3.96%	0.246		0.664	0.724	20.63%	13.90%
	C	-4.19%	0.208		0.723	0.682	18.09%	12.87%
平均值		2.74%	0.220		0.696	0.698	18.64%	13.25%
33	A	-3.23%	0.259	0.022	-	-	18.92%	12.02%
	B	-3.78%	0.238		-	-	17.81%	11.22%
	C	-3.04%	0.215		-	-	16.92%	10.59%
平均值		2.01%	0.237		-	-	17.89%	11.28%
34	A	-3.17%	0.209	0.017	-	-	14.72%	9.90%
	B	3.01%	0.216		-	-	15.70%	9.88%
	C	-1.67%	0.183		-	-	16.02%	9.63%
平均值		1.57%	0.203		-	-	15.48%	9.81%
35	A	-2.68%	0.201	0.010	-	-	14.54%	9.77%
	B	-3.00%	0.197		-	-	14.77%	9.35%
	C	2.01%	0.183		-	-	14.70%	9.03%
平均值		1.54%	0.194		-	-	14.67%	9.38%
36	A	-2.85%	0.212	0.011	-	-	14.91%	10.13%
	B	-2.73%	0.203		-	-	15.15%	9.87%
	C	-2.59%	0.189		-	-	15.38%	9.53%
平均值		1.63%	0.201		-	-	15.15%	9.84%
37	A	-3.58%	0.205	0.005	-	-	14.47%	10.23%
	B	-2.85%	0.215		-	-	15.22%	9.89%
	C	1.59%	0.210		-	-	18.87%	11.08%
平均值		1.60%	0.210		-	-	16.19%	10.40%

附錄七 各案例之量測資料統整表

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
38	A	-3.90%	0.255	0.022	-	-	19.83%	13.00%
	B	-3.55%	0.243		-	-	18.15%	11.58%
	C	-3.29%	0.213		-	-	17.57%	11.11%
平均值		2.15%	0.237		-	-	18.52%	11.89%
39	A	-3.54%	0.213	0.002	-	-	16.40%	11.05%
	B	-3.49%	0.215		-	-	17.21%	11.02%
	C	-3.34%	0.218		-	-	17.18%	10.88%
平均值		2.07%	0.215		-	-	16.93%	10.98%
40	A	-3.26%	0.237	0.010	-	-	19.82%	12.62%
	B	-3.16%	0.231		-	-	19.78%	12.02%
	C	2.27%	0.217		-	-	19.06%	11.20%
平均值		1.74%	0.229		-	-	19.56%	11.95%
41	A	2.98%	0.235	0.008	0.571	0.554	19.77%	12.34%
	B	2.97%	0.232		0.638	0.577	19.05%	11.76%
	C	4.15%	0.223		0.554	0.527	18.90%	11.25%
	AF	2.73%	0.242		0.568	0.552	20.60%	12.56%
	AB	4.46%	0.223		0.584	0.616	17.96%	12.04%
平均值		3.46%	0.231		0.583	0.565	19.26%	11.99%
42	A	7.30%	0.179	0.070	-	-	19.66%	15.58%
	B	6.44%	0.181		-	-	19.74%	15.13%
	C	8.30%	0.167		-	-	19.00%	14.54%
平均值		4.41%	0.176		-	-	19.47%	15.08%
43	A	7.19%	0.184	0.090	-	-	19.82%	17.90%
	B	7.37%	0.172		-	-	20.80%	17.88%
	C	7.75%	0.167		-	-	20.80%	18.11%
平均值		4.46%	0.174		-	-	20.47%	17.96%

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究

case index	位置	指數 α 平均誤差 (%)	α	α STD	近地表 長度尺度 (m)	平均 長度尺度 (m)	近地表 紊流強度	平均 紊流強度
44	A	6.45%	0.181	-	-	-	18.26%	13.76%
45	A	5.09%	0.184	0.011	0.826	0.878	20.93%	16.47%
	B	6.48%	0.172		0.982	0.895	21.50%	15.54%
	C	16.85%	0.167		0.878	0.825	18.85%	15.13%
	AF	5.03%	0.194		0.774	0.843	21.06%	16.13%
	AB	6.20%	0.179		1.065	0.994	20.62%	15.59%
平均值		7.93%	0.179		0.905	0.887	20.59%	15.77%
46	A	5.64%	0.192	0.045	-	-	20.18%	16.42%
	B	5.87%	0.196		-	-	19.93%	16.17%
	C	14.65%	0.117		-	-	17.76%	15.55%
平均值		5.23%	0.168		-	-	19.29%	16.05%
47	A	-8.59%	0.282	0.062	-	-	29.75%	22.93%
	B	-4.84%	0.236		-	-	26.54%	20.71%
	C	10.50%	0.160		-	-	23.11%	18.41%
平均值		4.79%	0.226		-	-	26.47%	20.68%
48	A	5.35%	0.213	0.022	0.794	0.829	22.32%	18.04%
	B	6.57%	0.197		0.799	0.784	21.14%	17.11%
	C	10.12%	0.155		0.867	0.829	20.86%	17.38%
	AF	-5.97%	0.200		0.717	0.819	22.18%	17.78%
	AB	6.18%	0.205		0.781	0.825	20.58%	18.21%
平均值		6.84%	0.194		0.792	0.817	21.42%	17.70%
49	A	5.78%	0.195	-	-	-	22.53%	17.94%

風洞實驗室不同縮尺流場之地況模擬研究 / 鄭元良研究主持

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：鄭元良、鍾光民、鍾政洋、周晉成、蘇皋群

出版年月：109 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：978-986-5450-29-8 (平裝)