

應用高精度數值地形模型進行CFD風場模擬

內政部建築研究所委託研究報告

105年度



# 應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 105 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)



計畫編號：PG10502-0004

# 應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

受委託者：社團法人中華民國風工程學會

計畫主持人：方富民

協同主持人：黎益肇

研究員：賴冠廷

研究助理：李唯嘉

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新台幣 136.6 萬元

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 105 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

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 圖次.....           | III |
| 表次.....           | VII |
| 摘要.....           | IX  |
| ABSTRACT .....    | XIV |
| 第一章 緒論.....       | 1   |
| 第一節 研究動機.....     | 1   |
| 第二節 研究目的.....     | 4   |
| 第三節 研究內容與方法.....  | 4   |
| 第二章 理論背景分析.....   | 7   |
| 第一節 數值地形模型.....   | 7   |
| 第二節 計算流體力學.....   | 11  |
| 第三節 大氣邊界層.....    | 15  |
| 第四節 文獻回顧.....     | 19  |
| 第三章 研究方法.....     | 21  |
| 第一節 風洞試驗.....     | 22  |
| 第二節 CFD 數值模擬..... | 28  |
| 第三節 研究區域模擬.....   | 30  |
| 第四節 數值計算格網製作..... | 35  |
| 第四章 結果與討論.....    | 39  |
| 第一節 數值地形模型資料..... | 39  |
| 第二節 模式驗證.....     | 41  |
| 第三節 研究區模擬結果.....  | 65  |
| 第五章 結論與建議.....    | 73  |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第一節 結論</b> .....             | <b>73</b>  |
| <b>第二節 建議</b> .....             | <b>75</b>  |
| <b>附錄一 採購評選會議意見回應</b> .....     | <b>79</b>  |
| <b>附錄二 期中審查意見與回應</b> .....      | <b>83</b>  |
| <b>附錄三 專家座談會意見與回應</b> .....     | <b>87</b>  |
| <b>附錄四 期末審查意見與回應</b> .....      | <b>89</b>  |
| <b>附錄五 環境風場數值模擬準則(草案)</b> ..... | <b>93</b>  |
| <b>附錄六 應用數值地形格網製作手冊</b> .....   | <b>103</b> |
| <b>參考文獻</b> .....               | <b>117</b> |



## 圖次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 圖 1-1 數值地形模型示意圖 .....          | 1  |
| 圖 1-2 計畫執行流程圖 .....            | 6  |
| 圖 2-1 DEM 與 DSM 示意圖 .....      | 7  |
| 圖 2-2 DEM 與 DSM 檔案格式示意圖 .....  | 8  |
| 圖 2-1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖 ..... | 17 |
| 圖 3-1 建研所循環式大氣邊界層風洞性能 .....    | 23 |
| 圖 3-2 地表風速計剖面圖 .....           | 25 |
| 圖 3-3 使用動態皮托管校驗地表風速計 .....     | 25 |
| 圖 3-4 地表風速計校正回歸線 .....         | 26 |
| 圖 3-5 多頻道電子式壓力掃瞄器 .....        | 27 |
| 圖 3-6 研究區範圍—新北市新板特區空照圖 .....   | 31 |
| 圖 3-7 風洞試驗模擬範圍 .....           | 31 |
| 圖 3-8 三個主要風向初步模擬與佈點 .....      | 32 |
| 圖 3-9 測點分布圖 .....              | 33 |
| 圖 3-10 風洞試驗配置 .....            | 34 |
| 圖 3-11 地表風速計埋設.....            | 34 |
| 圖 3-12 風洞實驗室平均風速與紊流強度剖面 .....  | 35 |
| 圖 3-13 研究區 CAD 模型 .....        | 37 |
| 圖 3-14 建築量體網格製作 .....          | 37 |

|  |    |
|--|----|
| 圖 3-15 數值地形模型轉換表面格網 .....                                | 37 |
| 圖 3-16 結合高精度數值地形模型網格製作流程 .....                           | 38 |
| 圖 4-1 研究區高精度 DSM .....                                   | 40 |
| 圖 4-2 研究區高精度 DEM .....                                   | 40 |
| 圖 4-3 CASE A 示意圖 .....                                   | 41 |
| 圖 4-4 CASE A 入流風速剖面圖 .....                               | 42 |
| 圖 4-5 不同格網解析之平均風速比較(垂直切面 $y/b=0$ ) .....                 | 43 |
| 圖 4-6 不同格網解析之紊流動能比較(垂直切面 $y/b=0$ ) .....                 | 44 |
| 圖 4-7 不同格網解析之平均風速比較(水平切面 $z/b=0.125$ ) .....             | 44 |
| 圖 4-8 不同格網解析之紊流動能比較(水平切面 $z/b=0.125$ ) .....             | 45 |
| 圖 4-9 k- $\omega$ model 平均風速比較(垂直切面 $y/b=0$ ) .....      | 46 |
| 圖 4-10 k- $\omega$ model 紊流動能比較(垂直切面 $y/b=0$ ) .....     | 46 |
| 圖 4-11 k- $\omega$ model 平均風速比較(水平切面 $z/b=0.125$ ) ..... | 47 |
| 圖 4-12 k- $\omega$ model 紊流動能比較(水平切面 $z/b=0.125$ ) ..... | 47 |
| 圖 4-13 RSM 平均風速比較(垂直切面 $y/b=0$ ) .....                   | 48 |
| 圖 4-14 RSM 紊流動能比較(垂直切面 $y/b=0$ ) .....                   | 48 |
| 圖 4-15 RSM 平均風速比較(水平切面 $z/b=0.125$ ) .....               | 49 |
| 圖 4-16 RSM 紊流動能比較(水平切面 $z/b=0.125$ ) .....               | 49 |
| 圖 4-17 k- $\epsilon$ model 平均風速誤差分析 .....                | 50 |
| 圖 4-18 k- $\omega$ model 平均風速誤差分析 .....                  | 50 |
| 圖 4-19 RSM 平均風速誤差分析 .....                                | 51 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 圖 4-20 CASE E 建築群模型 .....             | 54 |
| 圖 4-21 CASE E 量測佈點 .....              | 54 |
| 圖 4-22 CASE E 入流風速剖面圖 .....           | 55 |
| 圖 4-23 CASE E 計算域分配圖 .....            | 55 |
| 圖 4-24 CASE E 各測點平均風速比較(北風至南南東風)..... | 59 |
| 圖 4-25 CASE E 各測點平均風速比較(南風至北北西風)..... | 60 |
| 圖 4-26 CASE E 各測點平均風速相關性分布圖 .....     | 61 |
| 圖 4-27 各風向之相關性係數 .....                | 61 |
| 圖 4-28 NNE 風向行人高度風速等值圖比較.....         | 63 |
| 圖 4-29 整合之 NNE 風向模擬結果.....            | 63 |
| 圖 4-30 W 風向行人高度風速等值圖比較 .....          | 64 |
| 圖 4-31 整合之 W 風向模擬結果 .....             | 64 |
| 圖 4-32 計算區域示意圖 .....                  | 67 |
| 圖 4-33 DSM 表面平滑化示意圖 .....             | 67 |
| 圖 4-34 研究區之不同風向無因次風速比較圖 .....         | 70 |
| 圖 4-35 研究區各測點平均風速相關性分布圖 .....         | 71 |
| 圖 4-36 各風向平均風速相關性係數圖 .....            | 71 |
| 圖 4-37 研究區加入 DSM 後各測點平均風速相關性分布圖 ..... | 72 |
| 圖 A1 地表邊界處的柱體網格規劃示意圖.....             | 96 |

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

## 表次

|   |    |
|---|----|
| 表 2-1 大氣邊界層之 $\alpha$ 、 $\delta$ 及 $Z_0$ 建議值..... | 18 |
| 表 4-1 格網參數表 .....                                 | 43 |
| 表 4-2 AIJ CASE E 模擬邊界條件表.....                     | 52 |
| 表 4-3 AIJ CASE E 模擬參數設定表.....                     | 53 |
| 表 4-4 CASE E 各風向標準誤差與相關性係數.....                   | 58 |
| 表 4-5 研究區模擬邊界條件表 .....                            | 66 |
| 表 4-6 研究區模擬參數設定表 .....                            | 66 |
| 表 4-7 研究區各風向標準誤差與相關性係數.....                       | 69 |

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

## 摘 要

關鍵詞：數值地形模型、計算流體力學、風洞試驗、行人風環境

### 一、研究緣起

DTM(Digital Terrain Model)數值地形模型，泛指任何以數值化(digital)的方式來展現 3D 空間地形起伏變化的狀況，而目前世界上絕大多數國家的測繪界均改用數值高程模型 (Digital Elevation Model；簡稱 DEM)此一名詞來代替 DTM。國內早期的格網解析度為 40 m × 40 m，由於衛星航照及光達技術發展，現已有 5 m × 5 m 以下之高精度數值地形模型。

因都會區蓬勃的發展，人口的密集度也隨著增加；在有限的土地限制之下，必須興建較高的建築物來符合人們居住與活動的需求。高樓建築物在地面會造成局部風場加速的現象且行人風環境(pedestrian wind environment)的改變，影響行人及低樓層建築使用者的安全性及舒適性問題，進而影響行人在此區域活動之舒適性甚至於危害行人的安全，因此對於新建高層建築的行人風場環境評估已是設計時的必要條件。

由於計算流體力學軟體的發展迅速，部分軟體廠商發展了便於一般人使用的商用風環境評估軟體，讓使用者得以在利用如 Autocad、Sketchup 等建模軟體，建構好主量體以及鄰近的 3D 模型後，透過簡單的設定後得到風場模擬資訊。進行風環境模擬時，除依據數值模型建構建築量體模型外，該地區之地表高程亦需合理考量。如能在前述之高精度數值地形模型基礎上快速建構貼近實際的區域風環境模擬格網，對於風環境評估的正確性及可靠性將進一步提升。

### 二、研究方法及過程

本計畫是以數值模擬為主，風洞試驗為輔，建立以高精度數值地形

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

模型資料導入風環境模擬計算之格網製作技術。另透過數值模擬與風洞試驗資料之交互比對，並參考國外規範，並提出相關準則。

本研究之研究內容與步驟如後：

#### 一、國內外研究文獻及資料之蒐集與整理

- (1) 蒐集國內外以 CFD 模擬風環境以及高精度數值地形模型之相關研究。
- (2) 蒐集研究區之高精度數值地形模型資料。

#### 二、研究區選定與模型製作

- (1) 選定板橋新板特區為本研究之研究區，並進行現場調查確認量體與細節。
- (2) 製作數值模擬所需之 3D 模型以及風洞試驗之量體模型。
- (3) 建立高精度數值地形模型轉換並導入格網製作之技術。

#### 三、風洞試驗

- (1) 進行研究區 16 個風向角之環境風場風洞試驗。

#### 四、數值模擬

- (1) 進行研究區 16 個風向角之環境風場數值模擬。
- (2) 模擬二種 AIJ 風洞實驗結果，以確認數值模式。

#### 五、舒適性評估

- (1) 分別以風洞試驗及數值模擬結果評估分析研究區域內的風環境舒適度，交叉比對各項數據。

#### 六、準則草擬

- (1) 草擬以數值模擬評估行人環境風場之準則，提供相關執行單位參考。



### 三、重要發現

本研究重要發現如後：

- (1) 透過格網相依性分析，建議於主量體建築單一邊長上分配 10 至 20 個格點，最小網格解析建議為 0.05 倍邊長(0.05D)，以兼顧精度與計算效率。
- (2) 在單柱模擬的紊流模型比較中，RSM 的預測結果是最好的，值得推薦使用，但其計算時間是 realizable  $k-\epsilon$  model 的 3 倍，故使用時需適當考量計算能量問題。此外，RSM 模型對於格網形狀相當敏感，若格網偏度(skewness)、伸展率或形狀比(aspect ratio)過大則會不容易收斂。
- (3) 綜合本研究與日本 AIJ 等模擬分析結果，在進行實際都市 CFD 模擬驗證時，如以邊界層風速為參考風速時，建議標準誤差值應小於 0.2，整體相關性係數應高於 0.7。如以其他高度為參考風速時，則可根據模擬地況依指數率換算標準誤差建議值，以確保使用者之 CFD 模式、格網與各項參數設定合乎準則。
- (4) 在進行 CFD 驗證時，建議使用者應將其 CFD 模式套用在至少一個單一高層建築以及至少一個實際都市區域的複合型建築的風洞實驗結果進行比較，並參考前述第 3 點之標準誤差及相關性係數進行判定後，方能進行後續風環境評估工作。
- (5) 本研究以 CFD 模擬風環境並與風洞實驗量測進行比對，結果具有不錯的吻合度。雖然數值模擬部分結果有低估的現象，但其結果與實驗值呈現良好的線性相關，平均相關性係數均在 0.7 以上，標準誤差均在 0.2 以下。如經過適當修正後，導入合理的風環境舒適度評估準則，數值模擬應可成為評估行人環境風場的良好工具，唯須遵循相關準則進行，以確保模擬的可靠度。所建立之技術可提供建研所實驗室進

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

行風環境評估工作，提升實驗室檢測能量。

- (6) 本研究以日本 AIJ guideline 為骨幹，綜合部分 COST 條件，並經國內 CFD 相關學者建議後，修正部分條文以適於本國國情，草擬出環境風場數值模擬準則，並詳列於附錄三，提供給環境影響評估或都市設計審議參考。
- (7) 本研究所選定的研究區屬於平坦地形，在加入實際 DSM 表面後的無因次平均風速變化並不顯著。但整體來說，大部分測點的無因次平均風速有明顯提升。故就安全性考量，模擬時應適當納入地形因素，以符合現地之風場狀況。

#### 四、建議

##### 建議一

辦理高精度數值地形模型應用 CFD 模擬之教育訓練：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會

本研究以新北市新板特區為研究區，運用高精度數值地形模型資料導入風環境模擬計算，並由平坦地形風洞實驗結果驗證數值模式精確度。研究中所採用之 CFD 模擬技術可作為未來進行 CFD 行人風環境評估方法與程序之重要參考。此技術可透過教育訓練課程讓相關人員學習，提升 CFD 知能，以順應逐漸轉變的風工程研究主流方向。

除了軟體技術的提升外，建議可針對硬體—高速運算技術(HPC)進行同步提升，以因應未來硬體的需求。讓 CFD 模擬技術與風洞實驗相輔相成，持續開拓風工程研究。

## 建議二

推廣環境風場數值模擬準則：中長期建議

主辦機關：社團法人中華民國風工程學會

協辦單位：內政部建築研究所

近年來由於電腦硬體與效能之大幅提升，以數值模擬方法取代風洞試驗進行問題之分析已逐漸形成一個趨勢。除了可以大幅節省許多金錢與時間的付出外，並可以獲得更為完整且詳盡的變數動態資料以供設計評估之所需。因此，以數值計算來模擬空間中流場變化分布的研究成為另一種符合經濟性及實用性的選擇。然而，在進行行人環境風場數值模擬時，需審慎處理相關參數之設定，否則將造成模擬之失真或導致不合理之環境風場模擬結果。因此，推廣環境風場數值模擬準則確有其必要性。

## 建議三

未來課題建議：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

綜合本研究成果，建議未來課題如後：

- (1) 以數值模擬評估建築風載重之技術準則。
- (2) 複雜地形風場模擬評估研究。

## ABSTRACT

Keywords: digital terrain model, computational fluid dynamic, wind tunnel experiments, pedestrian wind environment

Digital terrain model (DTM) refers to any digital way to show 3D space terrain changes, and now the vast majority of countries in the world surveying and mapping circles are using digital elevation model (DEM) this term to replace the DTM. In the early days of Taiwan, the grid resolution was  $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ . Due to the development of satellite aeronautical and LIDAR techniques; there are now  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  high precision numerical terrain models.

Due to the vigorous development of the urban area, the population density also increased. In limited land conditions, higher buildings must be built to meet the needs of people living and activities. High-rise buildings will cause the local wind field near the ground to accelerate and the pedestrian wind environment changes, affecting pedestrian and low-rise building users' security and comfort issues, thereby affecting pedestrian activities in the comfort of even. Therefore, it is necessary to evaluate the pedestrian wind environment while the new high-rise building planning.

As the rapid development of computational fluid dynamics software, some software vendors to facilitate the development of the general use of commercial wind environmental assessment software, which allowing users to use the modeling software such as Autocad and Sketchup to build the 3D model of major building body and the adjacent buildings. Through the simple setup of simulation and obtain wind field information then. In the wind environment simulation, in addition to the construction of building volume model based on the 3D model, the surface elevation of the region also need to

consider reasonably. The accuracy and reliability of wind environmental assessment will be further improved if the grid which closing to reality can be quickly constructed on the basis of the above mention high-precision DTM.

The project is based on numerical simulation, supplemented by wind tunnel testing, the establishment of high-precision DTM data into the grid production technology of the wind environment simulation. In addition, this study through the comparison of numerical simulation and wind tunnel experiments, and referring foreign specification, then put forward the relevant criteria.

This project concludes that:

1. It is suggested to allocate 10 to 20 grid points on the single edge of the main building. The minimum grid resolution is 0.05 times the edge length (0.05D), so as to balance the accuracy and calculation efficiency.
2. In the simulation of single-column turbulence model In the comparison of turbulence model of the single prism case, the prediction of RSM is the best, it is recommended to use, but the calculation time is 3 times of realizable k- $\epsilon$  model. While adopting RSM model, the efficiency problem has to appropriate consider. In addition, the RSM model is quite sensitive to the grid shape, and it is not easy to converge if the grid skewness, stretch ratio, or aspect ratio is too large.
3. In the actual urban verification, when the reference height is at the boundary layer height, it is suggested that the standard error should be less than 0.2, and the overall correlation coefficient should be higher than 0.7. If the reference height is adopted the other position, the standard error value can be converted by the power law according to the simulated

ground condition. These indexes can check that the user's CFD method, grid distribution, and other parameters correspond to the criteria or not.

4. During CFD validation, the user should compare their CFD model to wind tunnel experimental results in at least one single high-rise building case and at least one actual urban area case.
5. In this study, CFD method is used to simulate the wind environment and compared with the wind tunnel experiments, and the predictions are in good agreement. Although the predictions of the numerical simulation are slightly underestimated, but in good linearity with the experimental values. The average correlation coefficients are above 0.7 and the standard errors are all below 0.2. If appropriate wind environmental comfort assessment criteria have been introduced, the numerical simulation should be a good tool for assessing the pedestrian wind environment; the premise is ensuring the reliability of the simulation and corresponding the relevant criteria. The established technology can provide the wind tunnel laboratory to construct technique for wind environmental assessment work to enhance the laboratory testing energy.
6. Based on the AIJ guideline of Japan, some COST conditions are integrated, and some suggestions are put forward by the CFD scholars of Taiwan to revise some of the provisions to suit our own national conditions, then we preliminary propose the CFD criteria for wind environment simulation. The criteria are detailed in appendix 3 and are provided for consideration of environmental impact assessment or urban design review.
7. The study area selected in this study belongs to the flat terrain, and the mean dimensionless wind speed change after adding the actual DSM

surface is not significant. But on the whole, the average dimensionless wind speed of most survey points has been rise obviously. Therefore, for safety considerations, the simulation should be properly incorporated into the terrain factors, in line with the current situation of the simulation field.

This project comes to the immediate and long-term strategies.

For immediate strategies:

1. The education and training on the application of CFD simulation in high-precision DTM.

For long-term strategies:

1. The popularization of CFD criteria for wind environment simulation.
2. Suggestions for future topics.
  - (1) CFD technical criteria for building wind load assessment.
  - (2) Investiation on CFD simulation of complex terrain wind field.





## 第一章 緒 論

### 第一節 研究動機

DTM(Digital Terrain Model)數值地形模型，泛指任何以數值化(digital)的方式來展現 3D 空間地形起伏變化的狀況(如圖 1-1)，而目前世界上絕大多數國家的測繪界均改用數值高程模型 (Digital Elevation Model 簡稱 DEM) 此一名詞來代替 DTM。國內早期的格網解析度為 40 m × 40 m，由於衛星航照及光達技術發展，現已有 5 m × 5 m 以下之高精度數值地形模型。為使我國躋身高科技國家，促進國土利用規劃，並充分發揮中華衛星二號功效，兼顧環保、科技與經濟發展，達到國土永續經營，內政部之 92 年研究計畫「高精度及高解析度數值地形模型建置計畫」，由內政部統籌資源測製全臺灣高精度及高解析度之 DTM，可提供國家整體建設規劃及各單位使用。

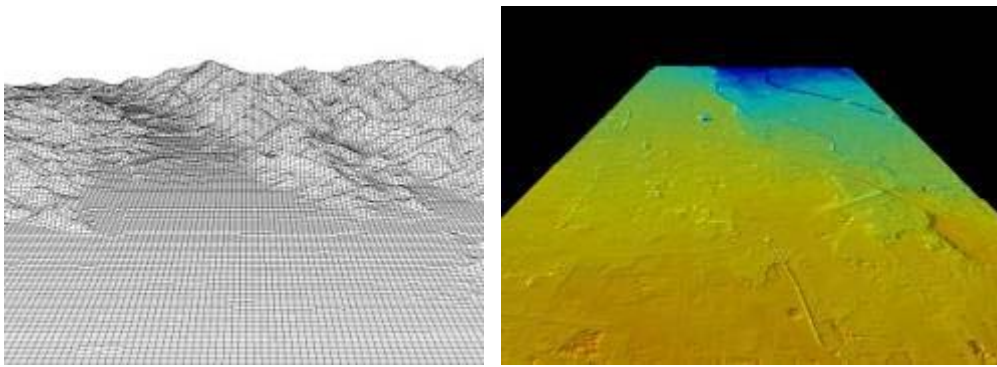


圖 1-1 數值地形模型示意圖

資料來源：內政部地政司衛星測量中心

因都會區蓬勃的發展，人口的密集度也隨著增加；在有限的土地限制之下，必須興建較高的建築物來符合人們居住與活動的需求。高樓建築物在地面會造成局部風場加速的現象且行人風環境(pedestrian wind

environment)的改變。高層建築可視為巨型阻礙物，氣流因建築、建築群的存在而改變行進方向，進而造成下切、縮流、渠化、渦漩(vortex)、角隅流(corner flow)、尾流(wake)；另有遮蔽、穿堂風(through flow)等效應。前述效應除了造成建築物或建築群興建後產生瞬間的強風，影響行人及低樓層建築使用者的安全性及舒適性問題，進而影響行人在此區域活動之舒適性甚至於有危害行人的安全，因此對於新建高層建築的行人風場環境評估已是設計時的必要條件。根據開發行為應實施環境影響評估細目及範圍認定標準第二十六條中所述，高樓建築有如後情形者，應實施環境影響評估：

- (1)住宅大樓，其樓層三十層以上或高度一百公尺以上。
- (2)辦公、商業或綜合性大樓，其樓層二十層以上或高度七十公尺以上。

在開發行為環境影響評估作業準則第二十二條中，開發行為中除煙窗外有七十公尺以上之高層結構體者，其可能產生之風場、日照、電波以及空氣污染物擴散之干擾等負面影響，應予預測及評估，並提出因應對策；必要時應進行相關之模擬分析或試驗。

綜觀目前國內有關行人風環境評估仍以風洞實驗為主要工具，而近年來因計算機能量、計算流體軟體普及和計算精度提升，以計算流體力學模擬結果來評估環境風場得以實現。在日本，目前已有 70%以上的工程評估案均以 CFD 來完成，日本、歐洲以及紐澳等國也提出了相關模擬準則來因應此一變革。

另由於計算流體力學軟體的發展迅速，部分軟體廠商發展了便於一般人使用的商用風環境評估軟體，讓使用者得以在利用如 Autocad、Sketchup 等建模軟體，建構好主量體以及鄰近的 3D 模型後，透過簡單的設定後得到風場模擬資訊。進行風環境模擬時，除依據數值模型建構建築量體模型外，該地區之地表高程亦需合理考量。如能在前述之高精度數值地形模型

基礎上，快速建構貼近實際的區域風環境模擬格網，對於風環境評估的正確性及可靠性將進一步提升。

雖然商用風環境評估軟體降低了 CFD 模擬風環境的門檻，但在數值模擬的各項理論參數及條件設定是欠缺通盤考量的。知名風工程學者 Tamura 和 Van 提到[42]，在進行風工程相關 CFD 模擬時，結構設計者或建築設計從業人員在無 CFD 專家協助時，自行進行 CFD 模擬評估風環境可能會發生如後狀況而造成模擬失真：

- (1) 依結構有限元素分析的思維去分配出過於粗糙的網格；
- (2) 計算區域劃分、邊界範圍給定、紊流模式選定造成的誤差；
- (3) 入流條件未真切表現大氣邊界層之特性；
- (4) 有關地表披覆物如植栽或小於格網尺寸的建築的源項(source term)並未處理或處理不良等。

雖然國內已有部分單位以 CFD 評估行人舒適度來進行環評，其風環境評估往往僅有風速比較，不但沒有合理且完整考慮當地氣象資料機率特性，也沒有結合人體受風舒適度評估準則來做探討，對於環境影響評估作業來說是不足的。

因此，整合高精度數值地形模型至風環境數值模擬之格網系統，並建立相關技術為本研究的主要目標。另由模擬區域開始乃至評估人體受風舒適性，擬定完整的 CFD 評估流程，供第一線人員以及環境影響評估、都市設計審議審查委員參考，避免 CFD 在行人風環境模擬上的誤用，以有效提升國人生活環境品質與安全。

## 第二節 研究目的

在評估高樓的行人風環境時，由於絕大多數均座落於都市中心或重劃區，需蒐集鄰近建築及地形地貌之數值地形圖後，製作網格進行 CFD 模擬。都市地區建築櫛比鱗次、錯綜分布增加了格網製作的困難度，而複雜地形的網格處理也是重大關鍵。此外，以 CFD 模擬行人風環境時，除兼顧格網解析度與質量外，仍有多項環節需審慎考量。本研究乃透過參數分析及與風洞實驗比較誤差，參考國外相關之研究與規範，初擬以 CFD 評估行人風環境之流程與準則，並建立以數值模擬結合高精度數值地形模型完整的技術。

## 第三節 研究內容與方法

本研究之研究內容與步驟如下(流程參見圖 1-2)：

### 一、國內外研究文獻及資料之蒐集與整理

- (1) 蒐集國內外以 CFD 模擬風環境以及高精度數值地形模型之相關研究。
- (2) 蒐集研究區之高精度數值地形模型資料。

### 二、研究區選定與模型製作

- (1) 選定板橋新板特區為本研究之研究區，並進行現場調查確認量體與細節。
- (2) 製作數值模擬所需之 3D 模型以及風洞試驗之量體模型。
- (3) 建立高精度數值地形模型轉換並導入格網製作之技術。

### 三、風洞試驗

- (1) 進行研究區 16 個風向角之環境風場風洞試驗。

#### 四、數值模擬

- (1) 進行研究區 16 個風向角之環境風場數值模擬。
- (2) 模擬二種 AIJ 風洞實驗結果，以確認數值模式。

#### 五、舒適性評估

- (1) 分別以風洞試驗及數值模擬結果評估分析研究區域內的風環境舒適度，交叉比對各項數據。

#### 六、準則草擬

- (1) 草擬以數值模擬評估行人環境風場之準則，提供相關執行單位參考。

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

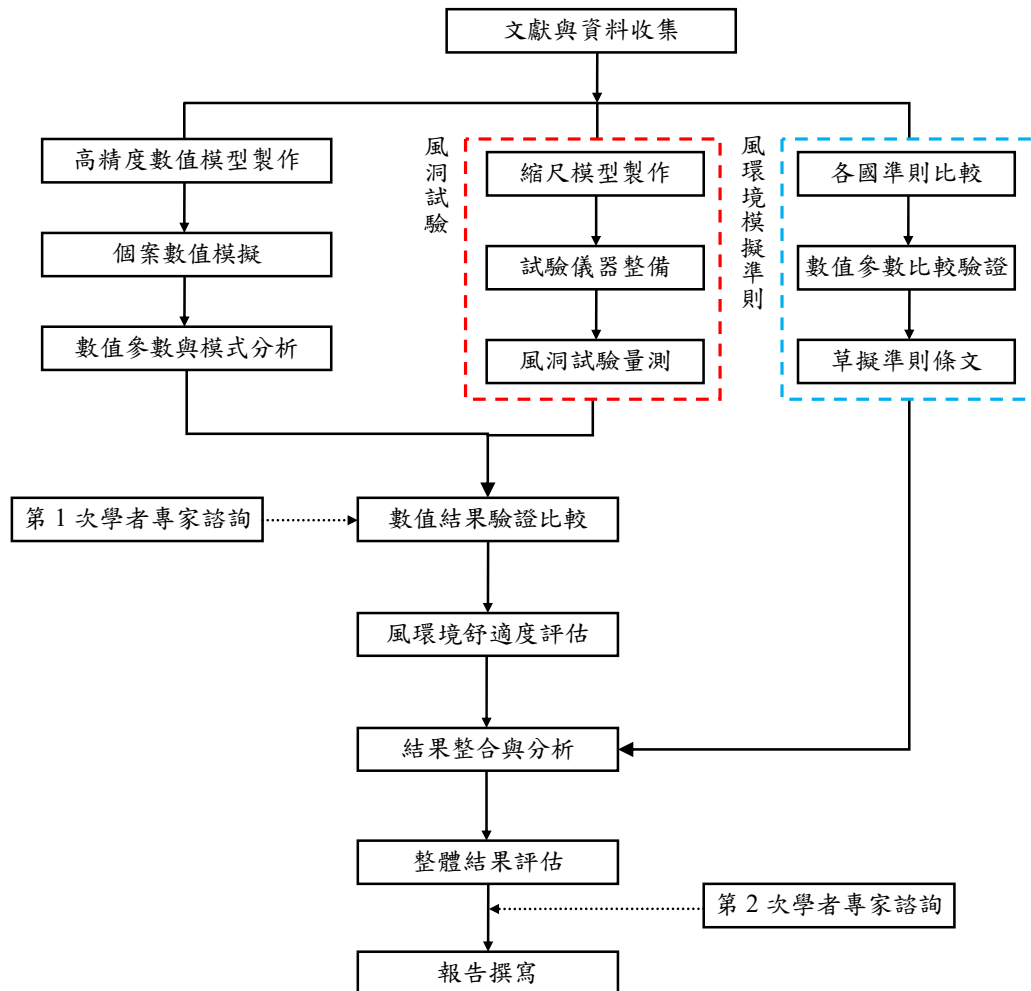


圖 1-2 計畫執行流程圖

資料來源：本研究繪製

## 第二章 理論背景分析

### 第一節 數值地形模型

DTM(Digital Terrain Model)數值地形模型，泛指任何以數值化(digital)的方式來展現 3D 空間地形起伏變化的狀況。其應用範圍相當廣泛，在地形分析上可用來進行坡度坡向計算、等高線製作，土木工程方面用來做挖填方計算、坡地或道路開挖，災害評估方面可用在災害崩塌容積計算，其他常見可用來做三度空間展示等等。

#### 一、數值地形模型定義

(1) 數值高程模型(Digital Elevation Model，DEM)

乃以數值化方式來展現三度空間地形起伏變化情形，為不含地表植被及人工構造物時地球表面自然地貌起伏的數值模型。

(2) 數值地表模型(Digital Surface Model，DSM)：

為地表(含建築物、植被等)之三度空間數值模型。

(3) 數值地形模型(Digital Terrain Model，DTM)：

在此泛指數值高程模型(DEM)及數值地表模型(DSM)。

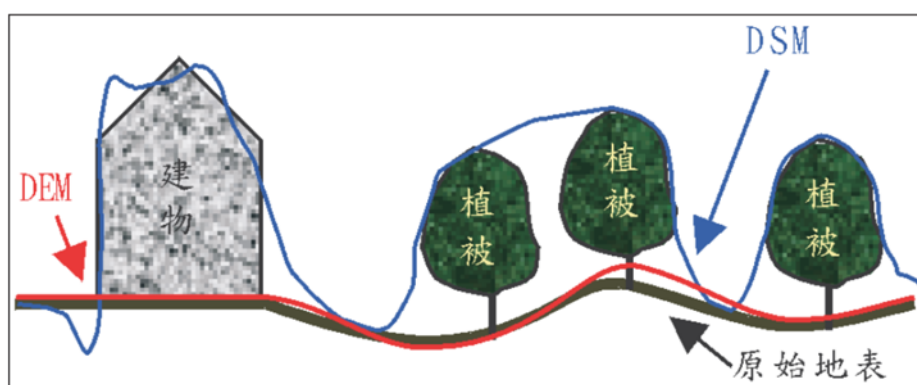


圖 2-1 DEM 與 DSM 示意圖

資料來源：[3]

一般可取得的 DEM 資料大多是儲存為紀錄 XYZ 的文字檔、或二維矩陣的 ASCII 格式，儲存檔案容量不但小，且流通性高。其二維矩陣如圖 2-2 所示，除了紀錄原點坐標、網格大小、X 軸和 Y 軸數目後，矩陣中則記錄高程值：

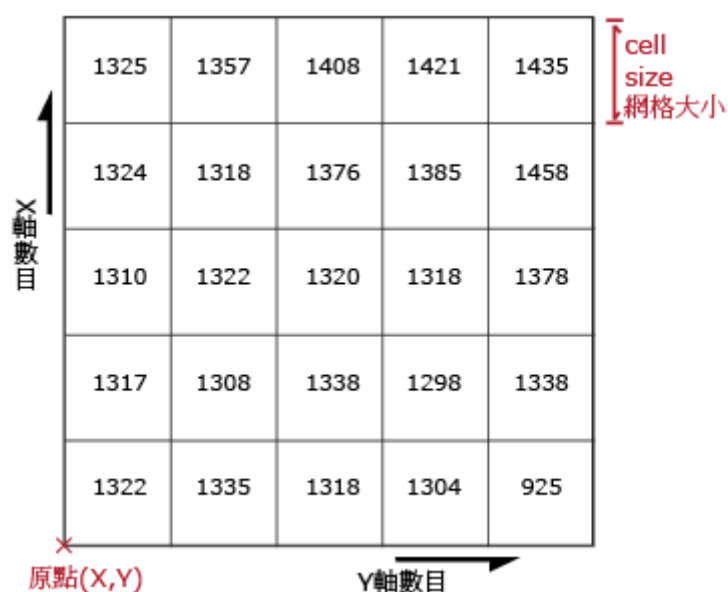


圖 2-2 DEM 與 DSM 檔案格式示意圖

資料來源：國土資訊系統

## 二、DEM 製作方法

測量 DEM 最經濟的方法是航空攝影測量，首先以人工或影像自動匹配的方式，在立體模型內量測出地表上足夠密度的離散高程點及用以描述地表特殊起伏形狀的地形特徵線(地形結構線、地形斷線)、特徵點(局部最高或最低點)，然後以適當的運算法則將這些量測的數據，過濾量測誤差後內差計算出等間距的網格。



近年來，由於空載光達的發明使得 DEM 的測製又多一種方法。「光達」(Lidar, Light Detection and Ranging) 有別於「雷達」(radar)使用微波，光達是使用雷射去掃瞄地面來進行偵測與距離量測之系統，也可稱為「雷射掃瞄儀」，藉由雷射掃瞄地面並解讀其回傳訊號得到高程資料。

由於光達採自動掃瞄，所以產製 DEM 的速度比航空攝影測量快速。但是光達偵測到的也是樹頂房頂之 DSM 資料，必須經由大量自動與人工的 7 植生濾除過程以得到原始地表之 DEM 資料。光達對於較密的樹林而言，能穿透樹林直接測到地表的光達點很少，因為人工要由此少數點來估計真實地表也是一件困難的事。其 DEM 之精度受到兩個因素之影響：

- (1) 所量測到地表點的密度及量測的精度。
- (2) 所量測的地形特徵線及特徵點的數量是否充分掌握地表起伏。

凡是量測點及線愈多則愈能表示出地表面較細緻的起伏，而應量測的點密度與精度又與所期望的 DEM 網格間距有關。製作 5 公尺間格的 DEM 所期望能達到的精度當然比 10 公尺的網格間隔要高。

## 二、高精度及高解析度數值地形模型建置計畫

臺灣第一次製作 DEM 是於 1983 年到 1985 年間，為 40 公尺間隔的 DEM。由於經費及技術的限制，該 DEM 製作時是以人工在解析測圖儀內於預先設定好坐標的 40 公尺間距網格點上，直接量測該點之地表高程作 DEM，如果預設好的網格點剛好有樹木或建物時要如何處理也不清楚。一開始此版本並未開放使用，後來經過陸續的修測、提升精度後，才交由中央大學太空及遙測中心管理，供各單位申請使用。長期以來，該 DEM 資料是學術及工程界使用 DEM 的唯一來源，對臺灣地區的科學研究及應用貢獻卓著。

隨著精度要求的提高，40 公尺網格的 DEM 間距太大，已不符合土地利用密集的現況需求，加上福衛二號遙測衛星 2 公尺高解析力影像之需求，內政部於 2004 年使用農航所所拍攝的比例尺 1:20,000 航空影像，全面重測間格 5 公尺的高精度高解析度 DEM，並同時產製 DSM 資料。整體作業於 2006 年完成。

## 第二節 計算流體力學

在電腦尚未被廣泛應用前，數學解析的方法常與實驗方法並列為研究方法的兩大主流。對一個流場問題而言，其求解係以一個足以正確描述流場變數（流速、壓力、溫度、濃度等）對時間與空間變化的微分方程式（亦稱控制方程式；governing equations）為基礎，配合以適當的起始與邊界條件（initial/boundary condition）後，應用數學工具推行出相應之流場數學解（mathematical solution）。然而，一個動力問題相應的控制微分方程式往往是非線性（non-linear）的，對此類問題數學解之尋求並非易事。更何況在實際問題中，隨著流場區域邊界幾何或動力條件複雜程度之增加，欲獲取一個精確的流場結果往往有頗高的難度。因此，在古典的解析方法中，常將區域邊界予以簡化以利求解，甚至沿用簡化但對真實流況描述能力較差之控制方程式以獲得流場的結果。在採取此雙重簡化的情況下，雖然達成了問題解析的目的，但是結果的真確度卻可能大打折扣。隨著近年來電子計算機軟、硬體方面的快速進步，以往在數學解析方面可能遭遇的各種困難，在運用數值解析（numerical analysis）的方法後，多已迎刃而解（此即所謂 CFD 的方法）。值得一提的是，在古典數學解析的方法中，流場結果是以時間與空間函數的數學形式表示出來，其在時空方面之變化均具有連續性；而在數值解析方法中，則為離散化（discretized）數值形態時空分佈的流場結果。

### 一、紊流模型

在實際的情況中，絕大多數之氣流流動均為紊流之形態。由於紊流中有渦漩（eddy）之存在而具有高度之散漫特性，故較難以掌握。因此在涉及紊流的計算中，都要對紊流模型的類比能力以及計算所需系統資源進行綜合考慮後，再選擇合適的紊流模型進行類比。基於雷諾平均之涅維爾—史托克(Reynolds Averaged Navier-Stokes, 簡稱 RANS)的紊流模

型常見的包括 standard  $k-\varepsilon$  模型、RNG  $k-\varepsilon$  模型、Realizable  $k-\varepsilon$  模型、RSM (Reynolds Stress Model, 雷諾應力模型) 模型等方法, 而基於空間平均概念之紊流模型則為 LES (Large Eddy Simulation, 大渦模擬)。LES 目前有 Smagorinsky-Lilly、Dynamic Stress、WALE 等求解方法。雖然 LES 方法的模擬精確度較高, 但其計算量負荷較重, 在工程應用上目前仍無法普及, 現階段常需藉助高速運算技術(High Performance Computing; HPC)方能有效進行。如後針對紊流模型作簡單的介紹:

### (1) standard $k-\varepsilon$ model

標準  $k-\varepsilon$  模型由 Launder 和 Spalding 提出, 模型本身具有的穩定性、經濟性和比較高的計算精度使之成為紊流模型中應用範圍最廣、也最為人熟知的一個模型。標準  $k-\varepsilon$  模型通過求解紊流動能 ( $k$ ) 方程和紊流消散率 ( $\varepsilon$ ) 方程得到  $k$  和  $\varepsilon$  的解, 然後再用  $k$  和  $\varepsilon$  的值計算紊流粘度, 最終採用 Boussinesq 假設得到雷諾應力的解。雖然得到了最廣泛的使用, 但因為標準  $k-\varepsilon$  模型假定紊流為等向性(isotropic)的均勻紊流, 所以在旋流 (swirl flow) 等非均勻紊流問題的計算中存在較大誤差。

### (2) RNG $k-\varepsilon$ model

RNG  $k-\varepsilon$  模型在形式上類似於標準  $k-\varepsilon$  模型, 但是在計算功能上強於標準  $k-\varepsilon$  模型, 其改進措施主要有: ①在  $\varepsilon$  方程中增加了一個附加項, 使得在計算速度梯度較大的流場時精度更高; ②模型中考慮了旋轉效應, 因此對強旋轉流動計算精度也得到提升; ③模型中包含了計算紊流 Prandtl 數的解析公式, 而不像標準  $k-\varepsilon$  模型僅用使用者定義的常數。④標準  $k-\varepsilon$  模型是一個高雷諾數模型, 而 RNG  $k-\varepsilon$  模型在對近壁區進行適當處理後可以計算低雷諾數效應。

### (3) realizable $k-\varepsilon$ model

本模式滿足雷諾應力的約束條件, 可以更精確地模擬平面和圓形射

流的擴散速度、旋性流計算、具有壓降梯度的邊界層流計算和分離流計算等問題，其計算結果更符合真實情況，故可有效改善 standard  $k-\epsilon$  model 的缺點，提升精度。

#### (4) $k-\omega$ model

$k-\omega$  模型也是二方程模型。標準  $k-\omega$  模型中包含了低雷諾數影響、可壓縮性影響和剪力流擴散，因此適用於尾跡流動計算、混合層計算、射流計算，以及受到壁面限制的流動計算和自由剪切流計算。

剪應力傳輸  $k-\omega$  模型簡稱 SST  $k-\omega$  模型，它綜合了  $k-\omega$  模型在近壁區計算的優點和  $k-\epsilon$  模型在遠場計算的優點，將  $k-\omega$  模型和標準  $k-\epsilon$  都乘以一個混合函數後再相加就得到這個模型。在近壁區，混合函數的值等於 1，因此在近壁區等價於  $k-\omega$  模型。在遠離壁面的區域混合函數的值則等於 0，因此自動轉換為標準  $k-\epsilon$  模型。

與標準  $k-\omega$  模型相比，SST  $k-\omega$  模型中增加了橫向消散導數項，同時在紊流黏度定義中考慮了紊流剪切應力的輸運過程。此外，其模型中使用的紊流常數也有所不同。這些特點使得 SST  $k-\omega$  模型的適用範圍更廣，例如可以用於具有逆壓梯度的流動計算。

#### (4) RSM model

雷諾應力模型中沒有採用渦粘度的同向性假設，因此從理論上說比紊流模式理論要精確得多。雷諾應力模型不採用 Boussinesq 假設，而是直接求解 RANS 方程中的雷諾應力項，同時求消散率方程。因此，在二維問題中需要求解 5 個附加方程式，在三維問題中則需要求解 7 個附加方程式。

理論上，雷諾應力模型應該比一方程模型和二方程模型的計算精度更高，但實際上雷諾應力模型的精度受限於模型的閉合形式，因此雷諾

應力模型在實際應用中並沒有在所有的流動問題中都體現出其優勢。

#### (5) LES model

其基本概念為在空間平均大渦流模擬的概念中，大於計算網格尺寸渦旋之運動係採直接模擬，小於計算網格尺寸渦旋之運動則以次網格紊流模型 (subgrid-scale turbulence model) 模擬之。

近年另有動態次網格紊流模型 (dynamic subgrid-scale turbulence model) 之提出，次網格紊流黏滯度的 Smagorinsky 常數並非固定值，其在各瞬間之空間分佈係經由粗與細兩套網格系統獲得之流場結果間比較而得。

## 二、壁面函數(wall function)

在受壁面限制的流動中，因為壁面附近流場變數的梯度較大，所以壁面對紊流計算的影響很大。基於 RANS 模式之紊流模型中假定紊流是等向性的，因此在壁面附近需要進行特殊處理。若用半經驗公式將自由流中的紊流與壁面附近的流動連接起來，這種方法被稱為壁面函數法。另一種方法是經由在壁面附近加密網格，同時調整紊流模型以包含壁面影響的方法，則稱為近壁模型法。

壁面函數法中又有標準壁面函數法(standard wall function)和非平衡壁面函數法(non-equilibrium wall function)。一般來說，標準壁面函數可以適用於大多數流動問題，也是 FLUENT 中預設的方法。而非平衡壁面函數法則適用於流場函數在壁面附近存在很大梯度的流動問題。

### 第三節 大氣邊界層

地表附近空氣的移動受到地面之起伏、建築物、林木作物分佈等的磨擦作用的影響，使得平均風速隨高度而變，形成一垂直分佈剖面，愈接近地表風速愈慢(參見圖 2-1)，即此「風速剖面」直接受到地表粗糙狀況之影響。而影響所及的範圍稱之為「大氣邊界層」，在邊界層頂部之風速通常稱之為梯度風速(gradient wind)。

一般風工程之應用所涉及的問題大都發生在較強的風勢情況下，而於近地表上數百公尺高度的大氣邊界層範圍內。在強風的情況下，大氣紊流作用遠超過熱對流作用。由於紊流之強制混合趨向於形成中性層差，所以本節對大氣邊界層之討論僅限於中性層差之大氣邊界層。

在中性層差的情況下，大氣邊界層之厚度視風之強度、地表之粗糙程度及所在之緯度而定，通常在數百公尺至數公里之間。本案之風洞模擬實驗中很重要之一項工作即是要模擬邊界層高度內紊流流場的各項重要性質，其中包括有平均風速特性及紊流特性。

#### 一、平均風速剖面

一般常用於規範邊界層風速剖面的有兩定律，一為指數律(power law)，另一則為對數律(logarithmic law)。

##### (1) 指數律(power law)

邊界層流中水平方向均佈之地形上的平均風速剖面，以指數律表示：

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

其中，U 為縱向之平均風速；Z 為地表上之高度； $U_{\delta}$  為梯度風速； $\delta$  為大氣邊界層厚度； $\alpha$  為指數。在現行工程應用中之假設為：①一個  $\alpha$  為定值之指數律可適用至梯度高度  $\delta$ ；②邊界層厚度  $\delta$  僅只為指數  $\alpha$  之

函數。

(2) 對數律(logarithmic law)

愈接近地表的地方，其風速的擾動性愈高，解析描述也就愈加困難。在地表層(或稱之為常應力層)其剪應力值  $\tau_u$  與地表面之剪應力值  $\tau_0$  極為接近，且其橫風向之風速分量極小。對邊界層橫風向之平均風速方程積分至高度，再加以整理可得：

$$Z_l = b \frac{u_*}{f} \quad (2-2)$$

其中， $Z_l$  為對數律之有效高度； $u_*$  為剪力風速  $= (\tau_0/\rho)^{0.5}$ ； $f$  為科氏力參數； $\rho$  為空氣密度。 $b$  為常數，其值約在 0.015 至 0.03 之間。微氣象學研究的一些結果顯示，在地表其平均風速剖面可用後式表示：

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2-3)$$

其中， $\kappa(\cong 0.4)$  為 Von Karman 常數； $Z_0$  為地表粗糙長度(roughness length)。公式(2-3)即為通常所稱之對數律。實場量測結果指出，在強風之情況下，對數律之適用範圍可達數百公尺之高度。有關在不同地表情況下，上述討論之大氣邊界層各參數的建議值詳見表 2-1。

## 二、紊流特性

紊流強度是紊流擾動流速大小的表達方式。將擾動風速之均方根值(root mean square)除以平均風速值，以百分比之方式表達出來。邊界層中某特定高度  $Z$  之紊流強度，其定義為[17]：

$$T.I.(%) = \frac{(\overline{u_i^2})^{0.5}}{U_i} \times 100\% \quad (2-4)$$

其中， $T.I.(%)$  為  $i$  方向上之紊流強度； $u_i$  為  $i$  方向上之擾動風速； $U_i$



為  $i$  方向之平均風速。而縱向擾動風速之均方根值與地表剪應力風速有下列關係：

$$\overline{u_i^2} = \beta u_*^2 \quad (2-5)$$

其中， $\beta$  值通常假定與高度無關，在一般工程應用上可取為 0.6。在非常粗糙的地況下，其值最低可達 0.4。

大氣邊界層中的紊流性質除了前述的紊流強度之外，紊流長度尺度(turbulence length scale)以及紊流頻譜密度函數(turbulence power spectrum density function)和交相關頻譜(cross-spectrum density function)都是進行風洞模擬時不可忽略的重要特性。

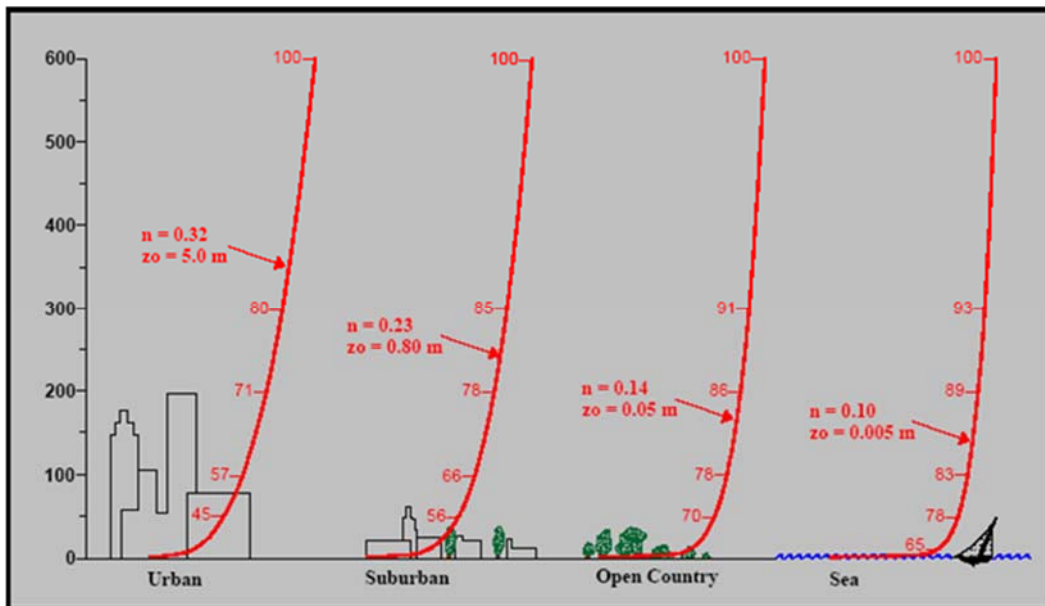


圖 2-1 不同地況下平均風速隨高度之變化示意圖

資料來源：[17]

表 2-1 大氣邊界層之  $\alpha$ 、 $\delta$  及  $Z_0$  建議值

| 參考文獻       | Coastal Area |            |                    | Open Terrain |          |                  | Suburban Terrain |          |                 | Centers of Large City |          |                 |
|------------|--------------|------------|--------------------|--------------|----------|------------------|------------------|----------|-----------------|-----------------------|----------|-----------------|
|            | $\alpha^1$   | $\delta^2$ | $Z_0^3$            | $\alpha$     | $\delta$ | $Z_0$            | $\alpha$         | $\delta$ | $Z_0$           | $\alpha$              | $\delta$ | $Z_0$           |
| Davenport  | —            | —          | —                  | 0.16         | 275      | —                | 0.28             | 400      | —               | 0.40                  | 520      | —               |
| ANSI       | 0.1          | 215        | —                  | 0.14         | 275      | —                | 0.22             | 370      | —               | 0.33                  | 460      | —               |
| Cook, N. J | —            | —          | 0.003<br> <br>0.01 | —            | —        | 0.03<br> <br>0.1 | —                | —        | 0.3             | —                     | —        | 0.8             |
| ESDU       | —            | —          | —                  | —            | —        | 0.02<br> <br>0.1 | 0.26             | —        | 0.2<br> <br>0.6 | 0.35                  | —        | 0.7<br> <br>1.2 |
| 耐風設計<br>規範 | —            | —          | —                  | 0.15         | 300      | —                | 0.25             | 400      | —               | 0.36                  |          |                 |

資料來源：本研究整理

<sup>1</sup>  $\alpha$ ：邊界層風速剖面冪數律指數

<sup>2</sup>  $\delta$ ：邊界層厚度，單位：公尺

<sup>3</sup>  $Z_0$ ：粗糙長度，單位：公尺

## 第四節 文獻回顧

### (1) 高精度數值地形模型應用

Maza 等[34]利用 10 m×10 m 的 DEM 資料，以 CFD 模擬 10×7 公里範圍內的複雜地形的風能潛勢，並與實驗量測之平均風速、紊流強度剖面比較，再仔細處理網格、地表粗糙度等變數後，得到不錯的吻合度。

Villanueva 等[44]利用 LIDAR 量測高精度的 DEM 及 DSM 資料(精度為 1 m×1 m)，並採用 GIS 空間工具針對 0.776 平方公里的城市區域進行房屋描繪。其中因 DSM 資料包含了房屋與樹木高程，故取 2.5 公尺作為分離之門檻。最後將所建置的房屋模型輸出，再導入 CFD 風場模擬計算中。與實際建構的房屋比較，房屋重建率可達 74%

### (2) 風環境模擬

有關以 CFD 進行風環境的評估準則，起始於 2000 年 ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion)出版的「Extensive set of best practice guidelines for industrial CFD users」[15]。其後，則有 2004 年歐洲 COST(European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research)的「Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment」[25]與 2008 年日本 AIJ (Architectural Institute of Japan) 所發表的「AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings」[7]。在紐西蘭則有 Blocken 於 2012 所發表的「Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models」[27]。

Yoshie 等[47]在日本新宿某區域進行長期的風速測量，並將測點得到的風速資料與風洞實驗、數值模擬做比較。數值模擬的部分則是使用三種不同 CFD 軟體與繪製三種不同的網格來進行比較。入流風速是設定為新宿三井大樓(237 m)與 KDD Building(高 187 公尺)量測的風速，將

數值模擬的結果與實場、風洞實驗同時進行比較研究後發現，在弱風且尾流區的地方模擬並不是令人滿意，但在強風區的精確度是比較高的(強風區實場與模擬誤差 10%)。至於實場模擬方面，其預測結果並不是不完全符合實場量測，但對於精準度的判定是較困難的。至於在紊流模式的比較上發現，標準紊流模式的結果要比 RANS 紊流模式來的好。雖然標準紊流模式會有放大渦旋能量的情況，但在採用 LES 模型時，這些情況可以有效改善的。然而，如採行 LES 來模擬，其計算量則超出一般工程應用的負荷，故建議模擬評估環境行人風場還是使用平均風速來的恰當。此外，若要取得有效風速，則是平均風速乘上紊流強度即可。

日本建築學會(AIJ)[46]進行了大量的數值模擬、風洞試驗、實地量測和不同的計算流體力學軟體。其中提到礙於龐大的計算量與時間，使用 LES 模型雖然可以獲得更精準的分析結果，目前建議風環境模擬可採 RANS 模型進行，並藉由 7 種案例互相比較提出較佳模擬風場環境的指南，且與歐洲規範(COST, European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research)比較其異同。

Mochida 等[36]回顧了近幾年在計算風工程(CWE)領域中，於預測都市區域行人高度之風和熱環境等在主要日本相關領域的研究。研究中除了概略回顧近十年常用的紊流模型及其應用於風環境相關問題外，並介紹了 AIJ 在風環境 CFD 與實驗交互比對合作計劃的結果。接著，也條列了披覆流(canopy flows)包含植栽、矮小建築群、移動汽車等之模式，並介紹該領域目前的成果。列舉之數值模擬結果顯示，在街廓中加入植栽和汽車披覆模式後，對於穩態和非穩態的次網格紊流場有顯著的影響。

### 第三章 研究方法

本研究選定台灣都會研究區域—新北市新板特區進行模擬風場研究，其模型縮尺為 1/250。模擬範圍為以新北市政府為中心半徑 450 公尺區域，範圍內建築量體約為 70 至 80 棟，以保麗龍製作量體模型。風速量測以 Irwin 探針量測行人高度(約 2 公尺，縮尺實驗高度為 8 mm)處之平均及擾動風速，據以了解風速風向特性及評估該地區之風環境舒適性，並作為數值模擬評估風環境舒適性之參考依據。

一般而言，就現有計算機能量直接模擬(DNS)都市地區環境風場在實務上是難以做到的。雖然大渦模擬(large eddy simulation)可有效降低計算量，且就現有的紊流模式來看，其精度高於其他模式，然計算量仍嫌偏高，於目前在工程應用上較難實現。而最常被使用的 standard k- $\epsilon$  model 在建築屋頂區域具有紊流動能高估的問題(Murakami et al.,1990)，但基於 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)穩態(steady-state)計算的 standard k- $\epsilon$  model 還是具有且高成本效益的特性，因此許多學者對於 standard k- $\epsilon$  model 提出有效的修正方式，諸如 RNG、realizable k- $\epsilon$  model 等紊流模型。本研究之風環境數值模擬採用 RANS 進行評估，並遵循日本建築學會(AIJ)風環境 CFD 模擬準則，據以獲得正確且完整之風環境資訊。

為確保採用數值模式的可靠度，除研究區模擬驗證外，另參考 AIJ 所提供的風洞實驗結果。此為日本建築學會整合日本國內風洞實驗室，採用熱線測速儀進行量測，具有相當高的可信度。於此選定一個簡單(CASE A)以及一個實際的都市地形(CASE E)進行模擬驗證，並進行參數分析。

另為應用高精度數值地形模型於 CFD 風場模擬中，本研究向內政部地政司申請研究區域範圍內，也就是新北市新板特區的高精度數值地形模型(DTM)，精度為 5 公尺一格。研究中將得到之資料轉換成地形高程

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

模型，再與建築模型結合後，製作格網以進行研究區之實尺寸模擬。藉高精度數值地形模型與 CFD 風場模擬兩種技術的充分結合，探討高精度數值地形模型對於 CFD 風場模擬的效益。

## 第一節 風洞試驗

本研究風洞試驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行，其風洞本體為一垂直向的封閉迴路系統，總長度為 77.9m，最大寬度為 9.12m，最大高度為 15.9m，為東南亞目前最大之建築風洞實驗室。

整個風洞本體具有兩個測試區段，第一測試區中配置有兩個旋轉盤，第一座旋轉盤直徑 1m，安置於距測試區入口處 3m 處，從事一般流體力學研究；第二座旋轉盤直徑 2.6 m，置於可移動式軌道上，定位於距測試區入口端約 25.5m 或 31.5m 處，並以機械控制使其做旋轉及上下運動，以進行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，位於風洞本體整流段出口 15m 處，轉盤直徑為 2.6 m，主要用途以橋梁測試為主。

環境風場試驗於本實驗室第一測試段之第二旋轉盤進行，本測試段長 36.5m、寬 4m、高 2.6m，最高風速為 30m/s。風洞頂部為可調式上蓋板，以維持測試段壓力梯度為零，並將阻塞比降到最低。實驗室相應性能參數與配置圖如圖 3-1 所示。

### 一、循環式風洞性能

#### (一)、風洞尺寸

|       |        |
|-------|--------|
| 測試段長度 | 36.5 m |
| 測試段寬度 | 4 m    |
| 收縮比   | 4.7:1  |

(二)、驅動系統

|      |           |
|------|-----------|
| 總功率  | 500 kW    |
| 風扇型式 | 直接傳動軸流式風扇 |
| 風速控制 | 變頻器控制馬達轉速 |

(三)、風速

|       |           |
|-------|-----------|
| 最高風速  | 30 m/s    |
| 邊界層厚度 | 最高 200 cm |
| 紊流強度  | 測試區處約 2 % |

(四)、順風向壓力梯度 零梯度由可調式上蓋板調整

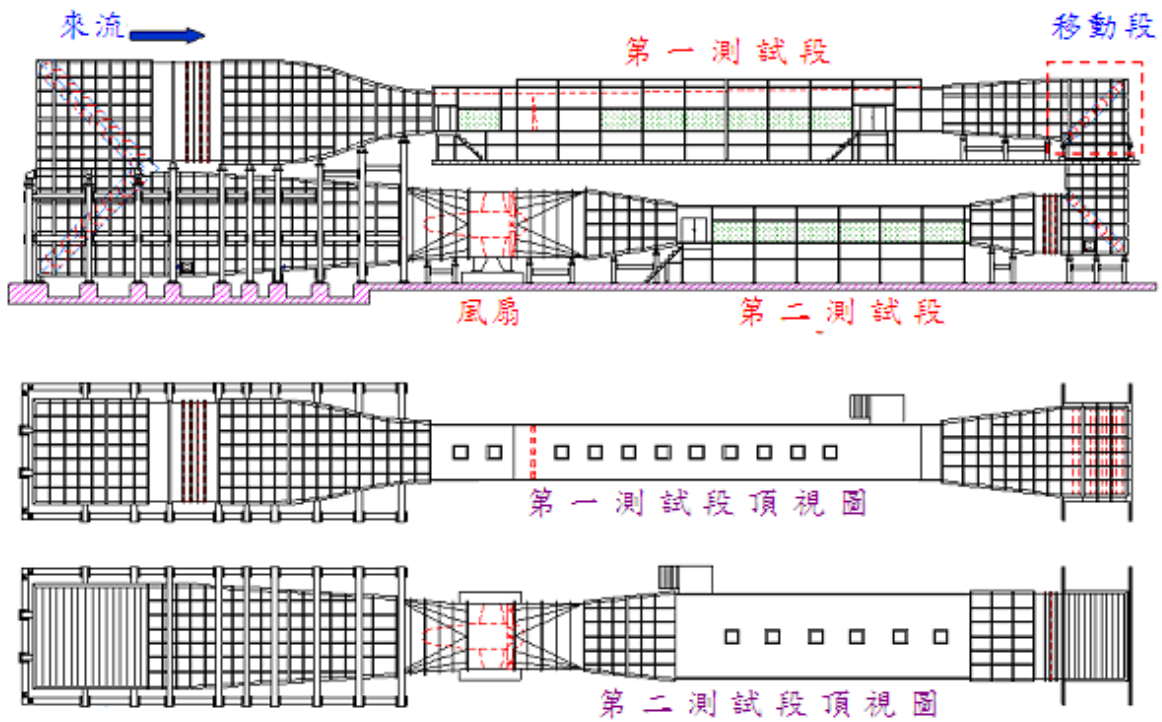


圖 3-1 建研所循環式大氣邊界層風洞性能

資料來源：【本研究整理】

二、風速量測設備

### (a) 皮托管

本研究採用皮托管進行來流平均風速之量測，由皮托管所量測到的壓力差值，利用伯努利方程式(Bernoulli equation)計算出相應之風速。

### (b) 熱線測速儀

來流風速剖面量測採用 Dantec 公司生產之熱線(hot-wire)測速儀進行。本熱線測速儀是利用電流通過金屬導線時會使導線溫度升高，而當流體流經金屬表面時會帶走部分熱量之原理來量測流體之速度。當探針(probe)所在位置之電阻 R 值因溫度之改變而改變時，使得電橋失去平衡。本實驗室所有之恆溫式流速儀，利用補償電路(compensating circuit)，因應流速之變動，對流經探測元之電流做瞬間之改變來維持探測元之操作溫度固定不變(因而探測元之電阻亦不變)，使電橋保持平衡狀態。如此即可經由回饋電壓的變化來得知所要量測流場中流速之變化。實驗中，將測速儀裝設於可垂直與橫向移動的移動機構，測針擺設位置均以電腦控制。

### (c) 地表風速計

在進行行人環境風場試驗時，於風洞實驗中須定義行人高度的風場，在風速的量測上，通常需要在不同的風向情況下，量測許多接近地表、不同位置的測點。由於邊界條件的複雜，導致各測點風向的高度不準確性。再加上紊流強度高，傳統之量測工具如皮托管與熱流速儀使用起來相當困難，其誤差亦大。

本案之行人高度風速量測採用 Irwin[32]於 1981 年所發展出來的無方向性地表風速計測器來進行。其原理是利用管與管中之細管(即管中管，內外兩管共一中心軸，但內管突出較高)，兩者間之壓力差，參照預先率定之結果，可迅速、正確地量測到行人高度上之水平方向風速(如見圖 3-2)。而其風速計算方式如下式所示，其中  $u$  為風速， $\Delta P$  為上述兩內外管



之壓力差， $\alpha$ 、 $\beta$  則為公式常數。

$$u = \alpha + \beta\sqrt{\Delta P} \quad (3-1)$$

進行試驗前須率定每個地表風速計(Irwin probe) 之  $\alpha$ 、 $\beta$  值方能進行風速計算，本研究以用三維動態皮托管進行率定，如圖 3-3 所示。將三維動態皮托管探針放置接近地表風速計處，同時量測 8 個風速點，將動態皮托管及地表風速計之壓力差繪製如圖 3-4 所示，進行線性迴歸即可得  $\alpha$ 、 $\beta$  值。

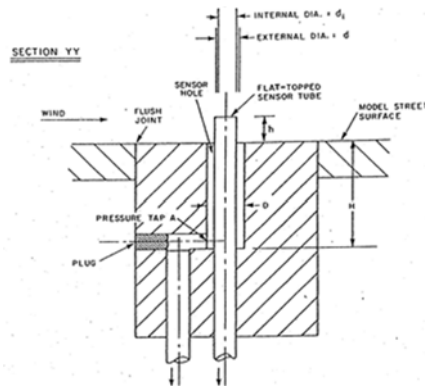


圖 3-2 地表風速計剖面圖

資料來源：[32]

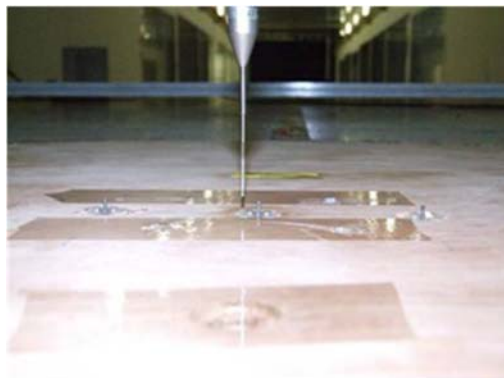


圖 3-3 使用動態皮托管校驗地表風速計

資料來源：本研究整理

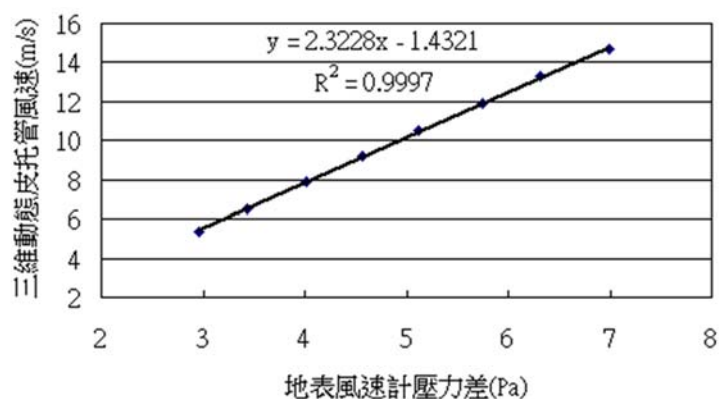


圖 3-4 地表風速計校正回歸線

資料來源：本研究整理

### 三、壓力量測設備

前述之風速量測方法中，亦涉及壓力之量測。本計畫採用多頻道電子式壓力掃描閥，用來同步擷取作用於各點地表風速計內外管的瞬時壓力，經過適當的處理便可得到該點行人高度之平均風速、擾動風速。

本儀器為 SCANIVALVE 公司之產品，如圖 3-5 所示，其元件包括：

#### 1. 壓力訊號處理系統(RADBASE3200)

- (1) 最多可支援 8 組類比訊號轉換成數位訊號之轉換器(A/D MODULE)
- (2) 最多可支援 8 組壓力感應模組，共 512 個壓力量測點。
- (3) 其類比訊號轉換成數位訊號(A/D convert)解析度達 16bit。
- (4) 最大採樣速率可達 500Hz
- (5) 採用 USB 介面傳輸。
- (6) 具備網路控制與傳輸功能。

#### 2. 壓力感應器模組特性：

- (1) 壓力感應範圍為 $\pm 10$ in H<sub>2</sub>O。

(2) 誤差範圍為 $\pm 0.2\%$ 。

實驗中將各個風壓孔之壓力訊號經 PVC 管傳遞至壓力感應器模組，其量得之訊號傳至壓力訊號處理系統計算後所得壓力值傳回電腦。

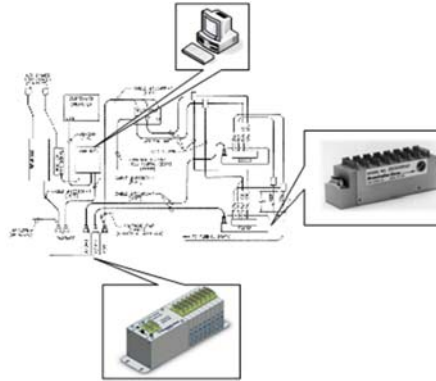


圖 3-5 多頻道電子式壓力掃瞄器

資料來源：本研究整理

## 第二節 CFD 數值模擬

近年來由於電腦效能大幅提升，以數值模擬方法代替實驗可大幅節省許多金錢與時間的付出，因此以數值模式來模擬空間中流體分布的研究成為另一種符合經濟性及實用性的選擇，而數值模擬在環境風場的應用愈趨普遍。相較於風洞試驗，數值模擬可在無縮尺狀況下模擬建築周圍環境微氣候，並較經濟地獲致完整之風場資訊，對於分析探討都市地區風環境影響評估有莫大的助益，唯計算域、格網解析度、紊流模式選定等相關之參數設定需要風洞試驗數據來做進一步確認。

本研究採用泛用型計算流體力學軟體 FLUENT 進行風場模擬工作，其乃基於以有限體積法(finite-volume method)為架構所建構出來的計算流體動力學程式，以求解如下之連續方程式與動量方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中， $u$ 、 $v$ 、 $w$  為速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三個方向之分量； $t$  為時間； $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  為場加速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  座標上之分量； $p$  為壓力； $\rho$  與  $\nu$  分別為流體之密度與運動黏滯度(kinematic viscosity)。FLUENT 採用有限體積法為主要架構，進而求解連續方程式與動量方程式在流場的速度及壓力，以克服對於複雜幾何形狀計算域的適用性問題。

有限體積法可將非線性偏微分方程轉變為網格單元上的線性代數方程，然後通過求解線性方程組得出流場的解。網格劃分可以將連續的空

間劃分為相互連接的網格單元。每個網格單元由位於幾何中心的控制點和將網格單元包圍起來的網格面或線構成，以求解流場控制方程，最後獲得所有控制點上流場變數的值。

FLUENT 中用於計算通量的方法包括一階上風格式(first order upwind method)、指數律格式、二階迎風格式(second order upwind method)、QUICK 格式、中心差分格式等形式。

使用 FLUENT 求解的基本步驟如後：

- (1) 選擇計算格式。在使用分離求解器時，選擇壓強插值格式。
- (2) 在使用分離求解器時，選擇壓強和速度的耦合方法。
- (3) 在使用分離求解器時，選擇多孔介質速度方法。
- (4) 選擇用於計算導數的梯度選項。
- (5) 設置鬆弛因子(relaxation factors)。
- (6) 在使用耦合求解器時，選擇使用 FAS 多重網格法。
- (7) 對所選用的模型和求解器進行細節設置。
- (8) 對流場進行初始化(initialization)。
- (9) 選擇求解過程監視器(monitor)。
- (10) 開始疊代運算計算。
- (11) 如果計算不收斂，可嘗試調整鬆弛因子、或格網品質等方式來解決。

### 第三節 研究區域模擬

本研究選定新北市新板特區作為研究區(如圖 3-6)，以新北市政府大樓(高度 141 公尺)為中心，模擬範圍為半徑 450 公尺。本區域數值地形圖如圖 3-7 所示。於北側為板橋火車站及站前廣場，建築高度達 117 公尺；西側為板信商業大樓，樓高為 166 公尺；東側為大遠百，為此區域最高之建築，最高高度為 211 公尺。

有鑑於地表風速計對低於 1 m/s 以下的風速的可靠度較低[32]，且本研究的行人風環境問題在於大樓興建後的強風，以往於風洞實驗中量測強風發生的位置常依據經驗進行佈點判斷，缺少合適的理論支持。為經濟且有效地利用實驗設備，合理的判斷強風發生區域，故本研究實驗測點之佈設乃利用 CFD 針對當地 3 個常季風風向，也就是北風(N)、東北東風(NEN)和東風(E)進行初步模擬，並找出高風速發生的位置進行佈點，初步模擬結果如圖 3-8。整合 3 個模擬方向模擬結果，找出風速較大的位置進行佈點。風速計佈設點位分布如圖 3-9 所示，合計共佈設 28 個測點。

本實驗於內政部建築研究所風洞實驗室進行(如圖 3-10)，地表風速計按圖 3-13 安裝於圓盤中心區域(圖 3-11)。入流風場地況為 B 地況，邊界層層緣風速( $U_\delta$ )為 9.5 m/s。實驗時以北風為起點，標記為 0°，每 22.5° 逆時針旋轉圓盤一次，共 16 個風向角。每次紀錄地表風速計資料，實驗取樣頻率為 250 Hz，取樣時間為 132 秒。

風洞入流邊界條件其平均風速剖面公式乃依據指數率(power law)給定，可由圖 3-12 的風洞實驗室量得之平均風速回歸得到  $\alpha$  為 0.18。依實場的邊界層厚度( $\delta$ )給定為 400 公尺(風洞實驗縮尺後為 1.6 公尺)，紊流強度剖面公式同樣依據風洞實驗室量測結果進行回歸所得，其公式為：

$$I(z) = 0.22 - 0.18 \left( \frac{z}{\delta} \right)^{0.6} \quad (3-4)$$



圖 3-6 研究區範圍—新北市新板特區空照圖

資料來源：本研究修改自 Google earth

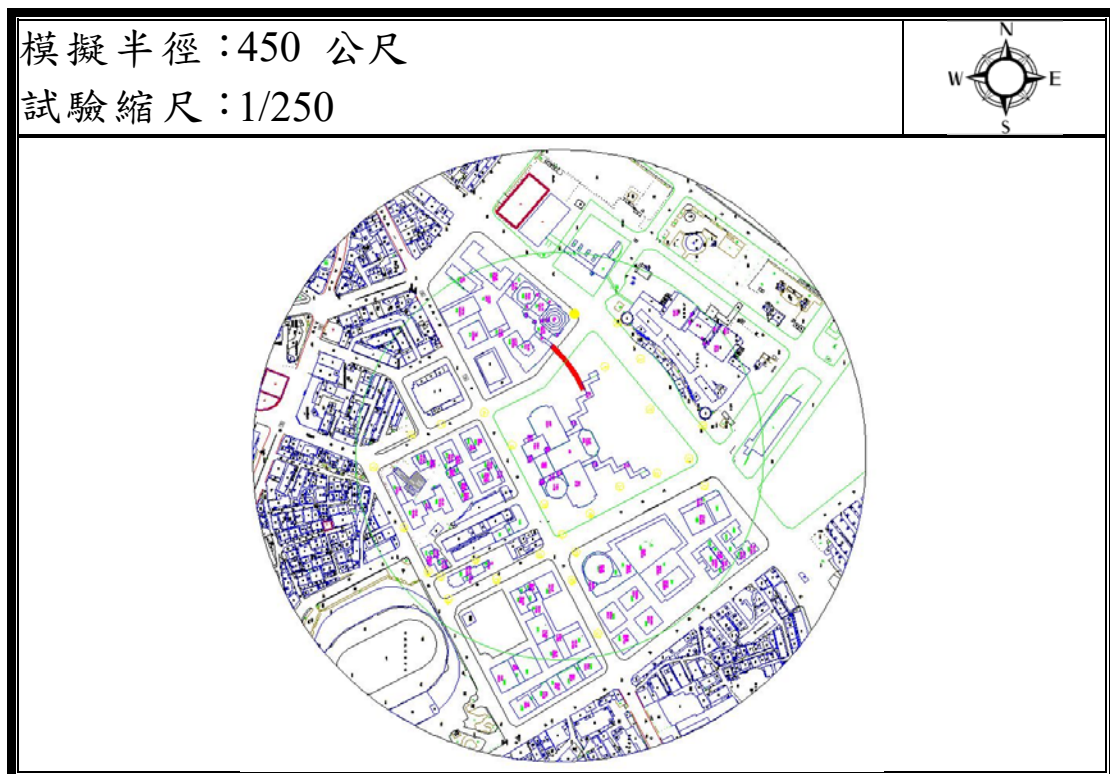


圖 3-7 風洞試驗模擬範圍

資料來源：本研究繪製



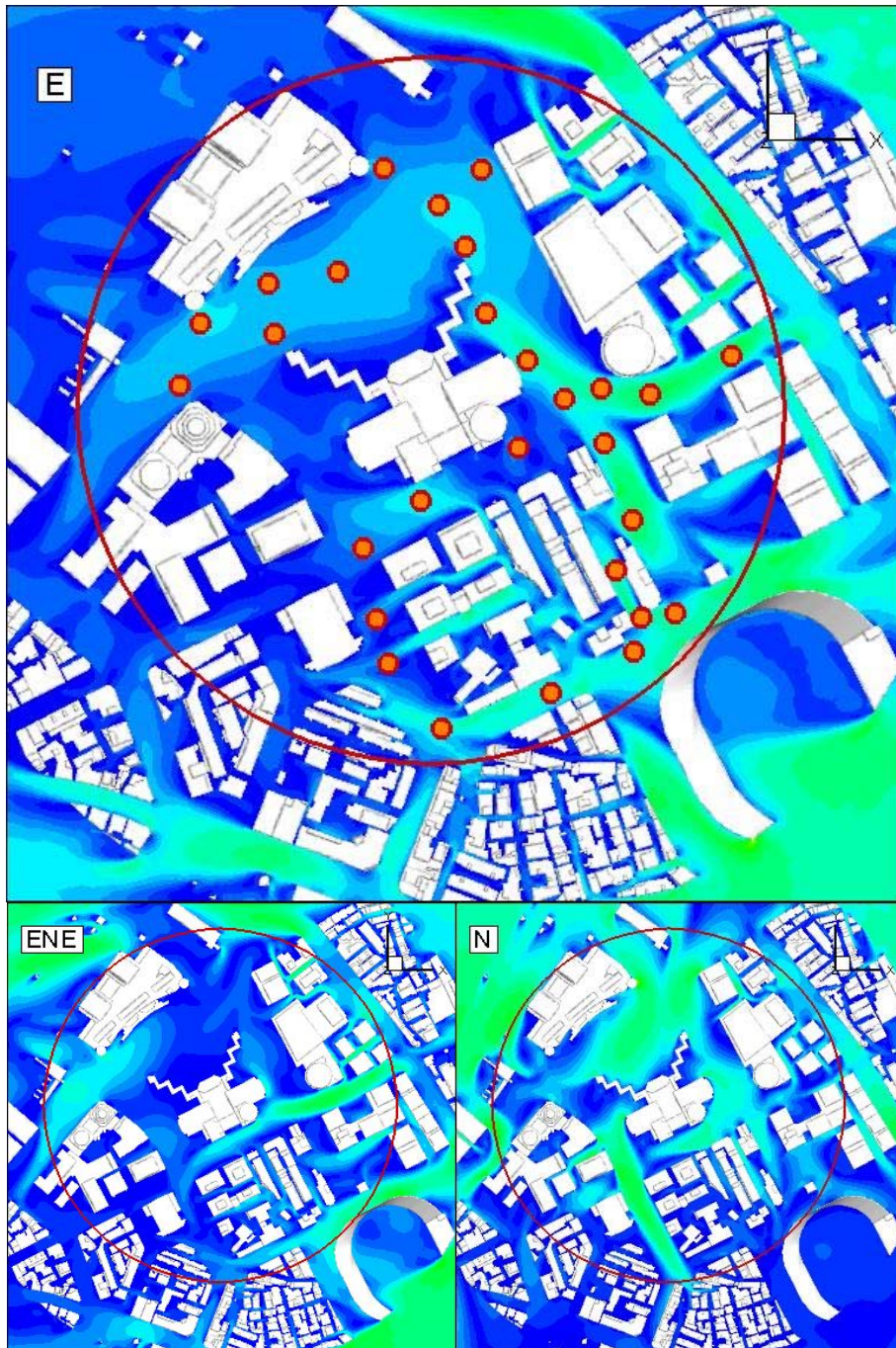


圖 3-8 三個主要風向初步模擬與佈點

資料來源：本研究繪製



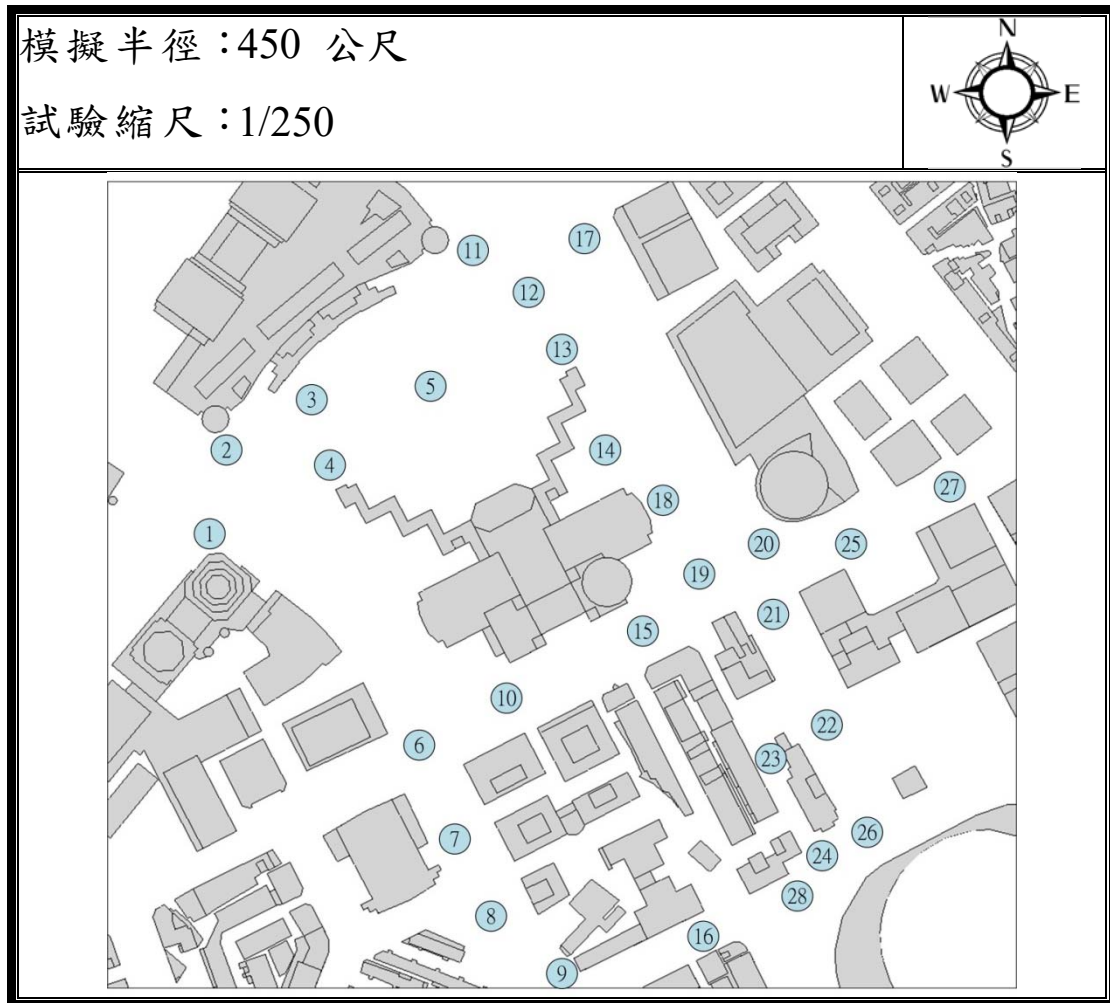


圖 3-9 測點分布圖

資料來源：本研究繪製

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬



圖 3-10 風洞試驗配置

資料來源：本研究拍攝



圖 3-11 地表風速計埋設

資料來源：本研究拍攝

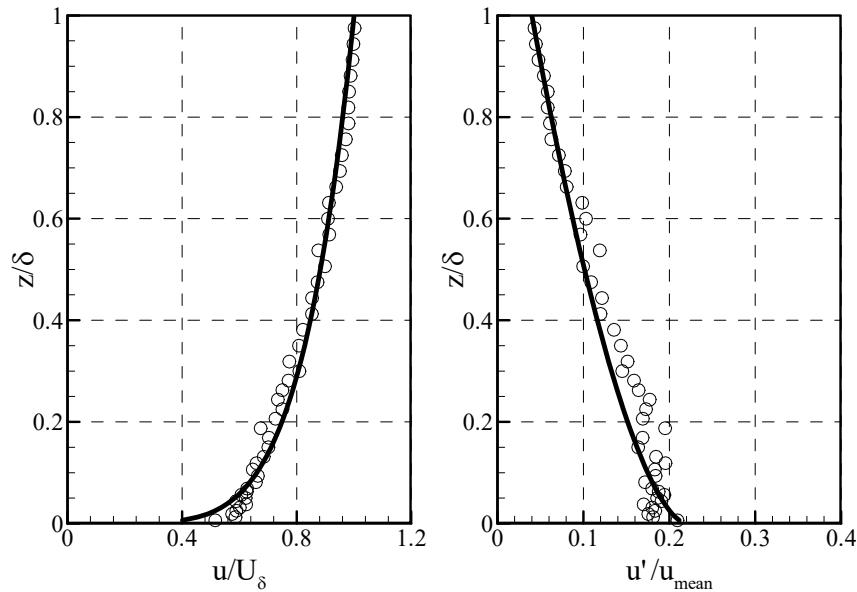


圖 3-12 風洞實驗室平均風速與紊流強度剖面

資料來源：本研究繪製

#### 第四節 數值計算格網製作

計算區域的格網製作乃採用 Pointwise 前處理軟體來進行。Pointwise 能提供計算流體力學(CFD)、有限元素分析(FEA)以及其他數值計算所需之網格。使用者不再受限於計算軟體或程式的限制，能輕易建構出高品質的網格。它可提供多種網格類別如多區塊六面體結構網格、四面體非結構網格和混合網格，生成後的網格可以輸出給數十種套裝軟體使用。

一般來說，以 CFD 進行實際風環境模擬時，於製作網格時會遇上兩個主要問題，包括模擬區域範圍內的建築群處理以及地形高程面模型的導入。如後介紹個別處理方法：

##### 一、房屋模型製作

本研究以數值地形圖重建平屋頂房屋模型，其作業程序主要工作分

為分析資料格式與萃取及編修相關房屋圖層兩部分。其中，蒐集建置房屋模型所需之資料包含數值高程模型、房屋輪廓線與樓層數。由於大比例尺數值地形圖中的房屋圖層，在僅有一層樓層數的房屋多邊形表示時，不會標示樓層數的資訊，故易與房屋中庭、或是任意房屋多邊形所圍成之非建物封閉多邊形造成混淆。因此，地形圖中的房屋圖層需先行處理，以獲取相對應的房屋輪廓線及樓層數資料。模型高程則是藉由坐標建立樓層數與模型間的空間關係，經擷取目標區數值高程模型，供後續建模時產生樓高的參考基準面。前述模型作業均可在 AUTOCAD 軟體中完成製作(參見圖 3-13)，由數值地形圖製作 3D 房屋模型，再將其匯出成 STL 或 IGES 檔案。這些檔案皆可匯入 Pointwise 軟體作為製作網格的體積 database，據以製作計算區域之建築群網格(如圖 3-14)。

## 二、地形高程面模型

地形高程面模型部分則需要數值地形模型 DEM 資料，該資料於固定間距下(高精度為 5 公尺)由左而右、由下而上的記錄著結構化座標  $x$ 、 $y$  以及高程  $h$ 。但此種資料格式無法被 Pointwise 辨識，因此將其轉換成 PLOT3D，再導入 Pointwise 成為表面 database，成為計算域的底面格網(如圖 3-15)。要注意的是，轉換成 PLOT3D 格式時，需先計算 DEM 資料的矩陣大小，表面模型才能被適當被建構出來。

在整合高精度數值模型至 CFD 模擬網格時，必須先由前述方法分別建立房屋模型量體以及地形表面模型，接著將量體與地表面模型(STL 或 IGES)匯入 POINTWISE 成為 database。將模型資料經過式當修復整理後，利用軟體功能將建築模型與地表模型進行縫合(trim)；接著按照分配線(connectors)-面(domains)-體(blocks)的過程，逐步建立起 3D 格網。房屋模型結合高精度數值地形模型至網格製作之整體流程如圖 3-16，應用數值地形格網製作手冊請參見附錄五。

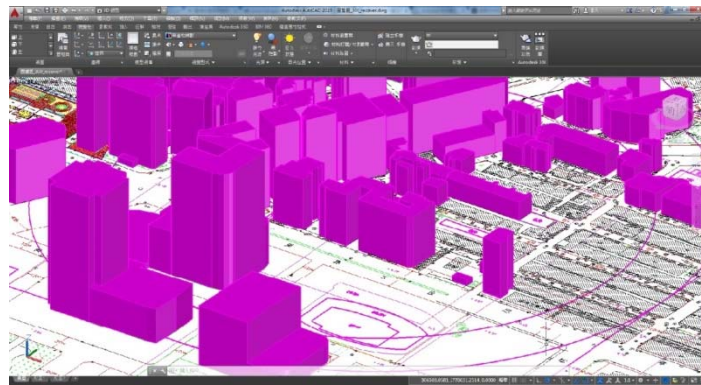


圖 3-13 研究區 CAD 模型

資料來源：本研究繪製

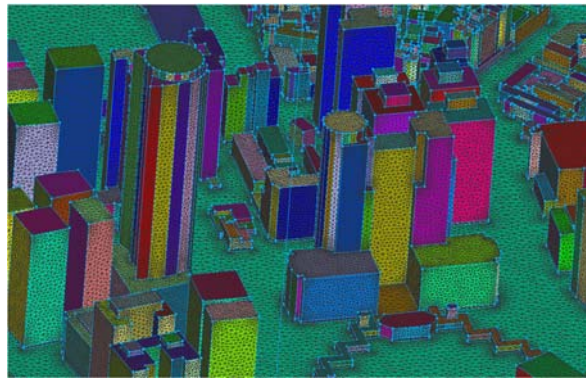


圖 3-14 建築量體網格製作

資料來源：本研究繪製

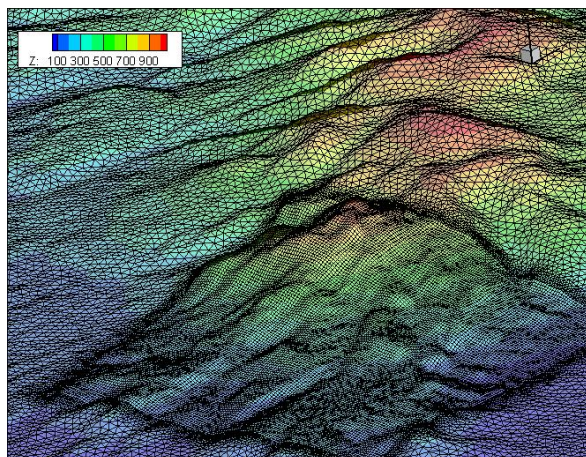


圖 3-15 數值地形模型轉換表面格網

資料來源：本研究繪製



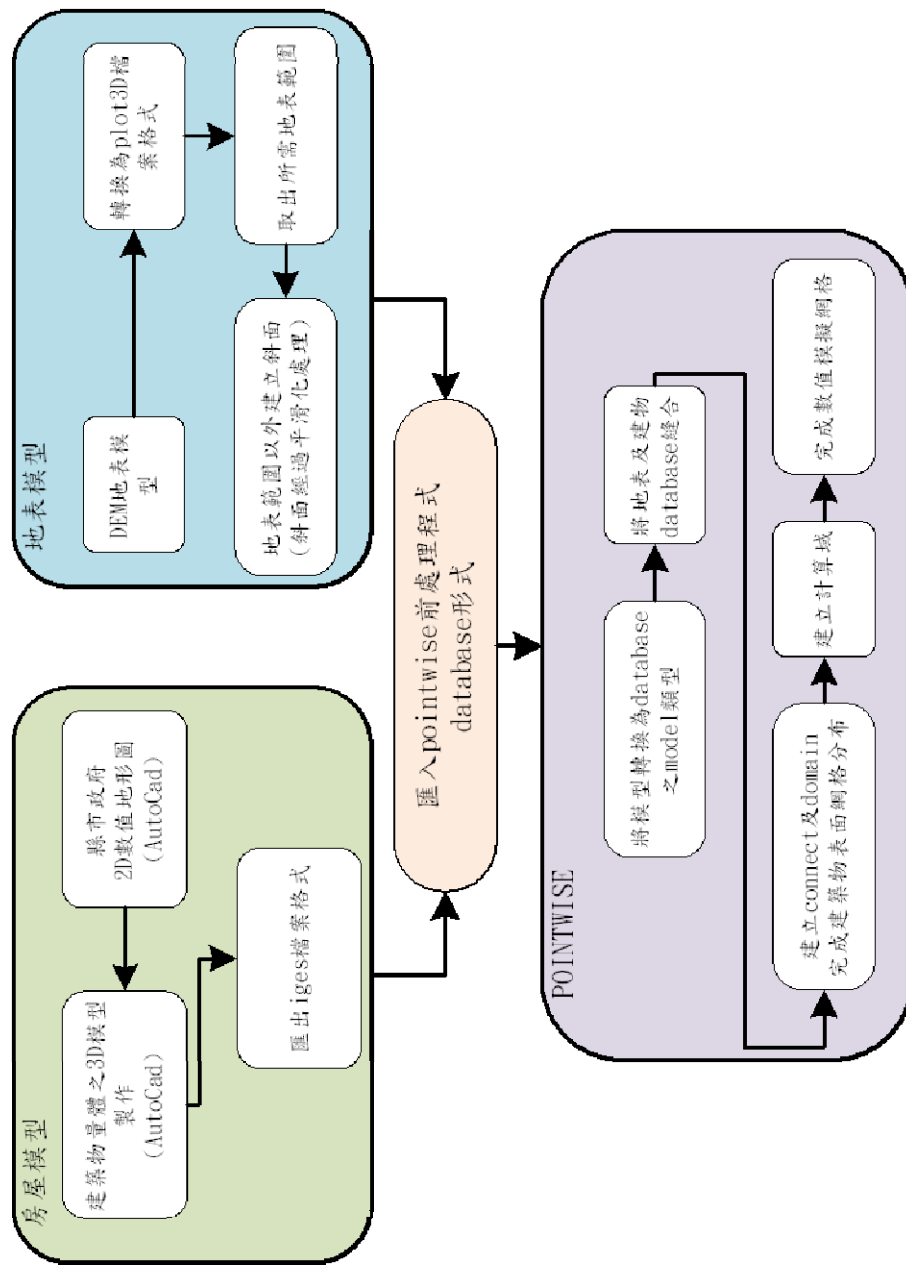


圖 3-16 結合高精度數值地形模型網格製作流程

資料來源：本研究繪製

## 第四章 結果與討論

本研究初步蒐集了研究區的高精度數值地形模型(DSM、DEM)，並將其轉換成 PLOT3D 格式，以利後續製作研究區之面網格。其次，針對 AIJ 之 2 種類型(單一建築、實際建築群)的風環境的實驗量測結果，進行 CFD 模擬比對，以確認選定之數值模式以及相關參數設定。

在研究區分析部分，首先針對平坦地形下之風洞實驗結果進行驗證，確認所採用數值模式的可靠度，接著檢視加入數值地形模型表面後的風場模擬結果，比較加入前後的風場變化，以了解地形對於行人風環境的影響程度。

### 第一節 數值地形模型資料

所蒐集之新板特區高精度數值地形模型圖號分別為 96232088、96232089、96232098、96232099，矩陣大小分別為 512×561、511×561、511×560、511×561，解析度為 5 公尺一格，整體涵蓋範圍為 10.2 km×11.2 km。

本區域之數值表面模型 DSM(圖 4-1)，其中包含建築物及植栽等地表覆蓋物，最高高度為 126 公尺，最低高度為 1.62 公尺。由圖面可以看出建築群的輪廓線以及北側大漢溪及淡水河之河道區域。另和先前蒐集得來的數值地形圖比對建築高度後發現，因為本次蒐集之 DSM 模型資料建置時間較早(96 年所建置)，並未包含近期已興建完成的建築以及高架橋等相關資料，故與現有狀況相較有些落差。

圖 4-2 為研究區數值高程模型 DEM。扣除建築、橋梁及地表植栽後，本區域的高程變化並不明顯，最高高程為 38.75 公尺，最低高程為 1.02 公尺，後續將結合此部分資料進入研究區之 CFD 風環境模擬之中。

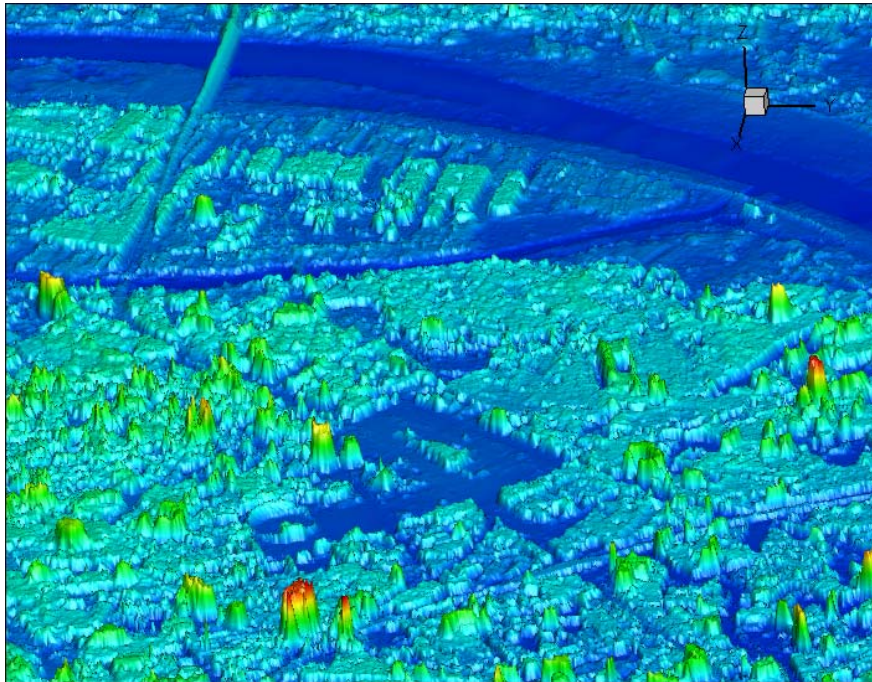


圖 4-1 研究區高精度 DSM

資料來源：本研究繪製

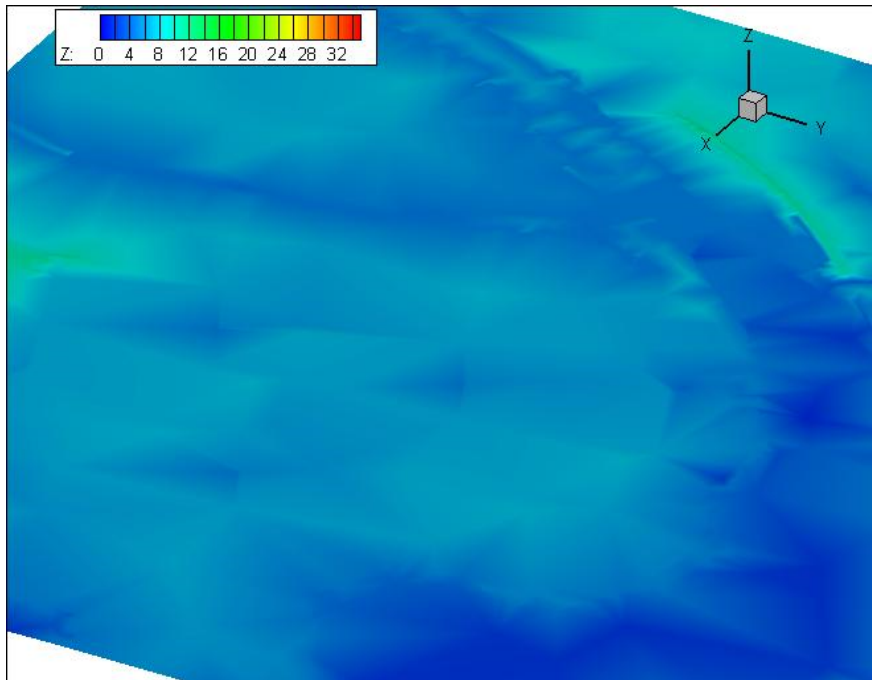


圖 4-2 研究區高精度 DEM

資料來源：本研究繪製



## 第二節 模式驗證

本節選定 AIJ[7]的 2 組驗證範例作為為驗證對象，分別為單一方柱 (CASE A)以及日本新潟市(Niigata, CASE E)的風洞實驗量測結果作為 CFD 比對驗證之參考。

### 一、AIJ CASE A

本例分析的對象為邊界層流中的 2:1:1(高度：寬度：深度)方柱，其實驗配置如圖 4-3，特徵長度  $b$  為 10 公分，入流平均風速及紊流動能剖面如圖 4-4。於此針對格網相依性(grid dependence)、4 種紊流模式結果進行誤差分析，比較平均風速及紊流動能，找出合適之格網解析度與紊流模式。

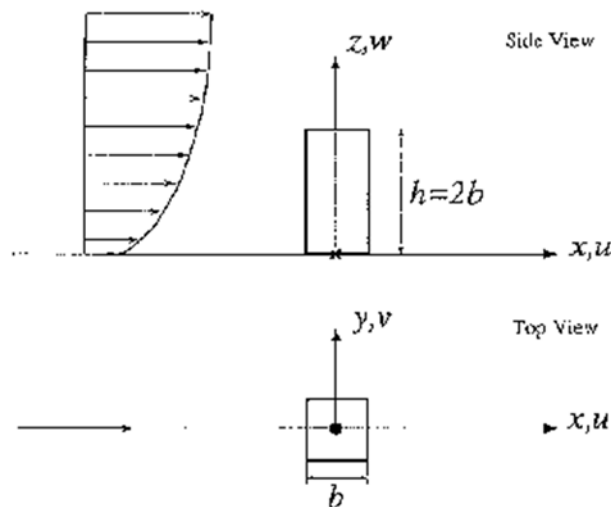


圖 4-3 CASE A 示意圖

資料來源：[http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm)

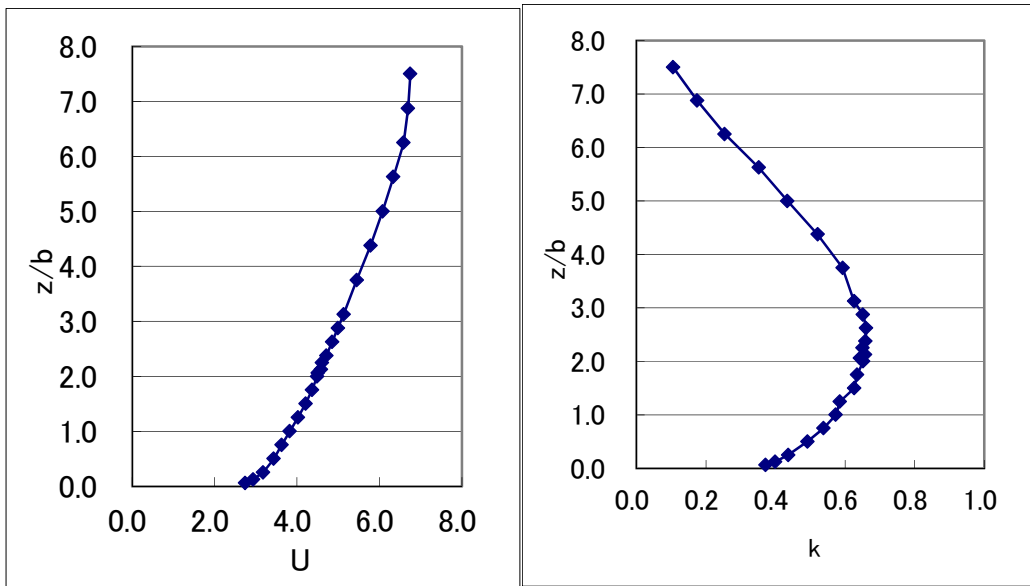


圖 4-4 CASE A 入流風速剖面圖

資料來源：[http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm)

#### (1) 格網相依性

一般來說，越細密的格網其模擬的精度越高，但相對地必須付出高計算量的代價。如何在效能與精度間作取捨，是 CFD 模擬工作中的重要課題。本研究選用三種不同細密度的格網進行模擬比較，標準(standard)格網的最小網格尺寸為  $0.05b$ ，最大網格尺寸為  $0.5b$ ，屬於結構化網格配置。而粗糙(coarse)與細密(fine)網格的最大及最小網格的尺寸，分別是標準網格放大約 1.5 倍以及縮小約 1.5 倍。相關網格參數如表 4-1 所示，紊流模型則是採用 realizable  $k-\varepsilon$  model。

表 4-1 格網參數表

| model        | 計算域        | 格網數量 X*Y*Z           | 最小格網尺寸 | 最大格網尺寸 |
|--------------|------------|----------------------|--------|--------|
| 粗糙(coarse)   | 28b×9b×13b | 88×42×56=206,976     | 0.077b | 0.77b  |
| 標準(standard) |            | 132×57×81=609,444    | 0.05b  | 0.5b   |
| 細密(fine)     |            | 195×85×121=2,005,576 | 0.033b | 0.33b  |

資料來源：本研究製作

檢視垂直切面的平均風速(圖 4-5)可以得知，3 種格網的結果差異並不明顯，皆在柱體後方的風速在下游遠處預測值略有低估的現象，同樣的低估現象在紊流動能結果(圖 4-6)中發生。粗糙網格於柱體頂部的預測值明顯低估，於水平面結果的側邊也有類似的低估現象(圖 4-7、圖 4-8)。由於標準網格與細密網格的結果相當一致，故可判定標準網格已達格網的獨立性(independence)。

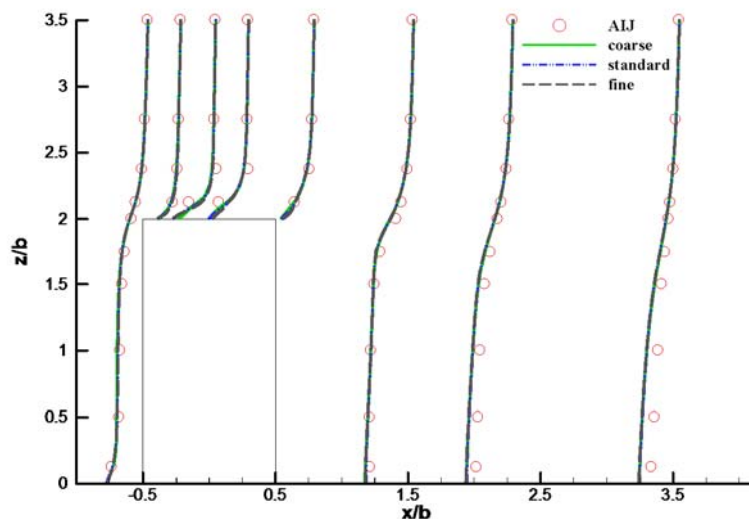


圖 4-5 不同格網解析之平均風速比較(垂直切面  $y/b=0$ )

資料來源：本研究繪製

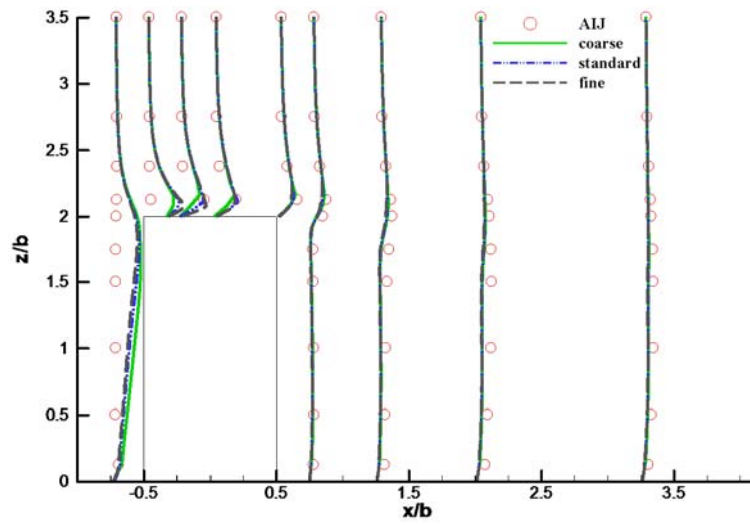


圖 4-6 不同格網解析之紊流動能比較(垂直切面  $y/b=0$ )

資料來源：本研究繪製

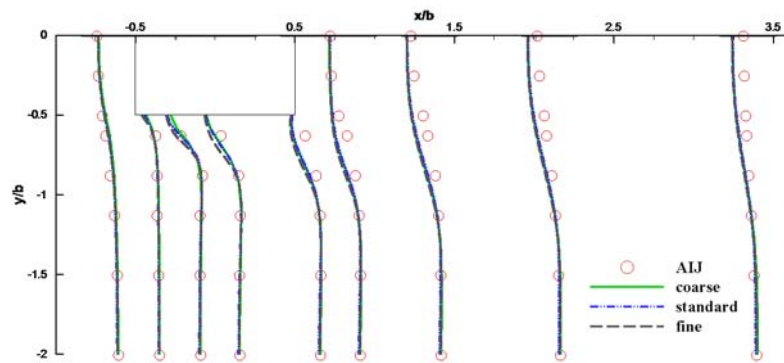


圖 4-7 不同格網解析之平均風速比較(水平切面  $z/b=0.125$ )

資料來源：本研究繪製

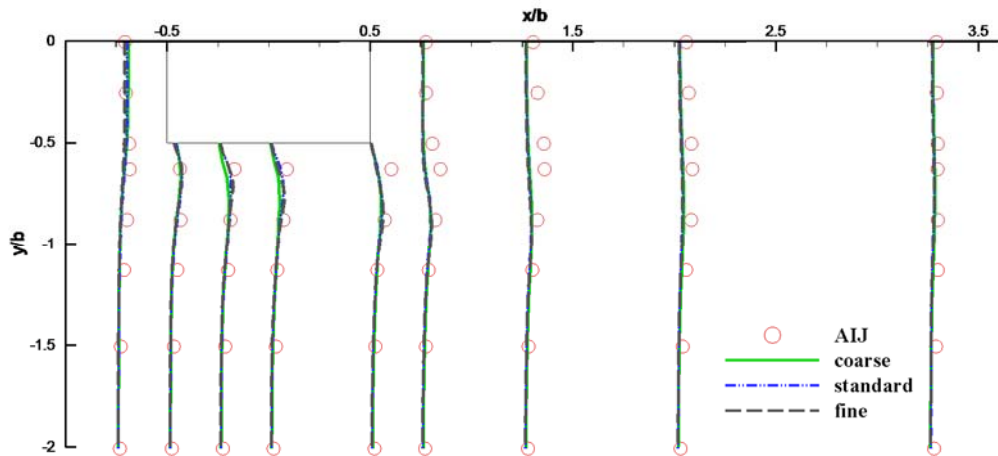


圖 4-8 不同格網解析之紊流動能比較(水平切面  $z/b=0.125$ )

資料來源：本研究繪製

## (2) 紊流模型比較

研究中於標準格網系統下，繼針對  $k-\omega$  model 以及 RSM 進行模擬比對。結果發現(圖 4-9 至圖 4-16)，相較於 realizable  $k-\epsilon$  model(圖 4-5 至圖 4-8)，柱體後方尾流區的表現較優。雖然也有低估的現象發生，但整體來說較為接近實驗值。另從誤差分析結果來看(圖 4-17 至圖 4-19)，RSM 的預測結果是最好的，值得推薦使用。然而，其計算時間是 realizable  $k-\epsilon$  model 的 3 倍，使用時需適當考量計算能量問題。

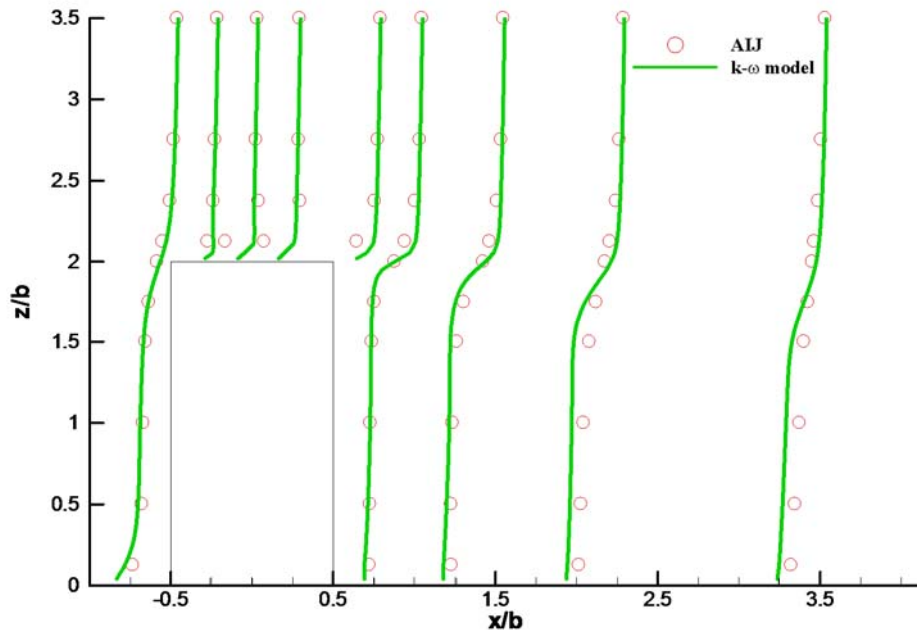


圖 4-9  $k-\omega$  model 平均風速比較(垂直切面  $y/b=0$ )

資料來源：本研究繪製

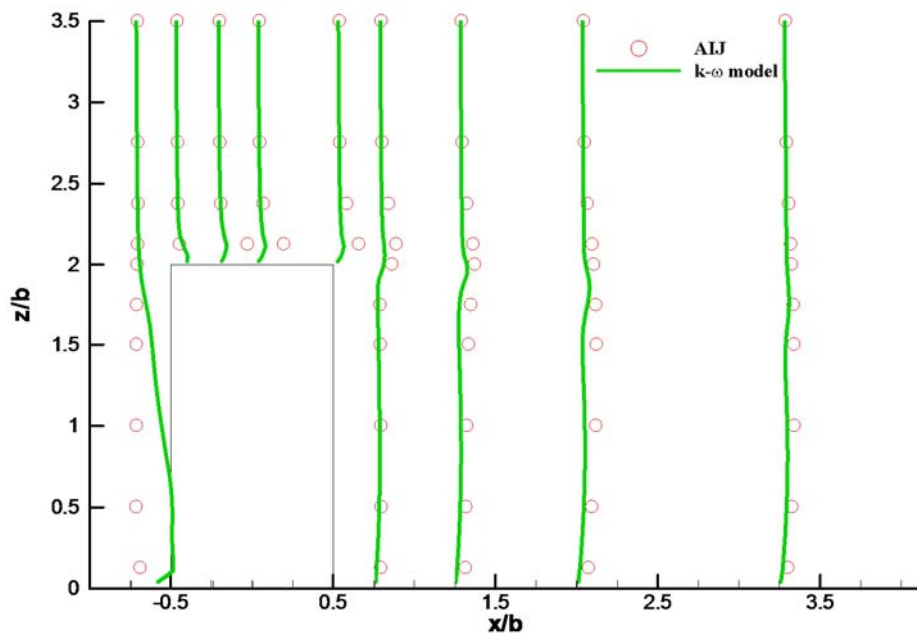


圖 4-10  $k-\omega$  model 紊流動能比較(垂直切面  $y/b=0$ )

資料來源：本研究繪製

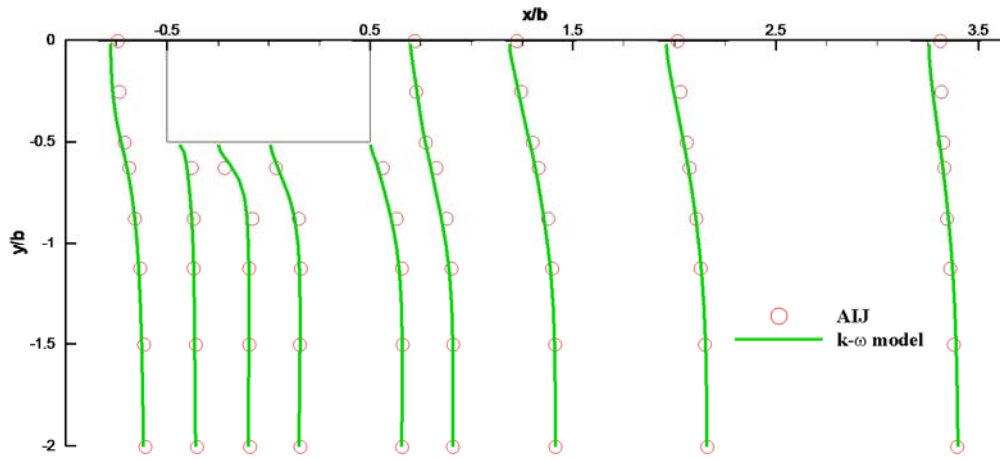


圖 4-11 k- $\omega$  model 平均風速比較(水平切面  $z/b=0.125$ )

資料來源：本研究繪製

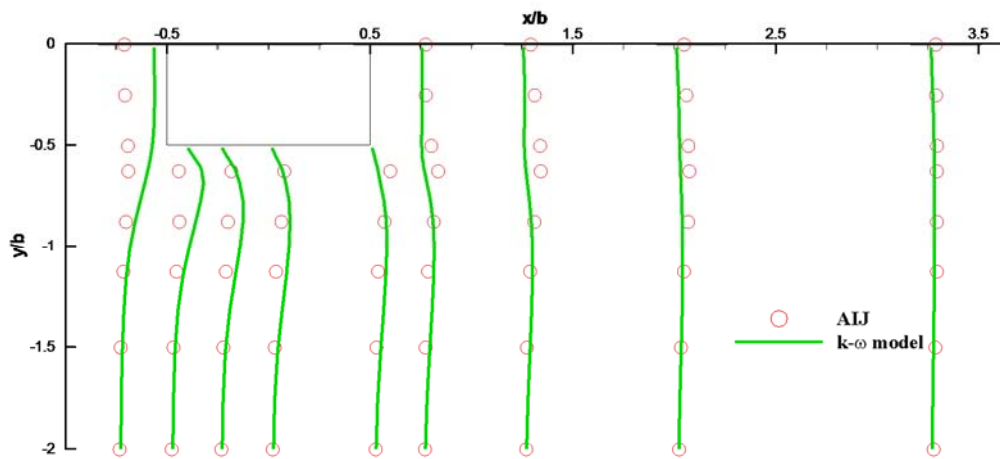


圖 4-12 k- $\omega$  model 紊流動能比較(水平切面  $z/b=0.125$ )

資料來源：本研究繪製

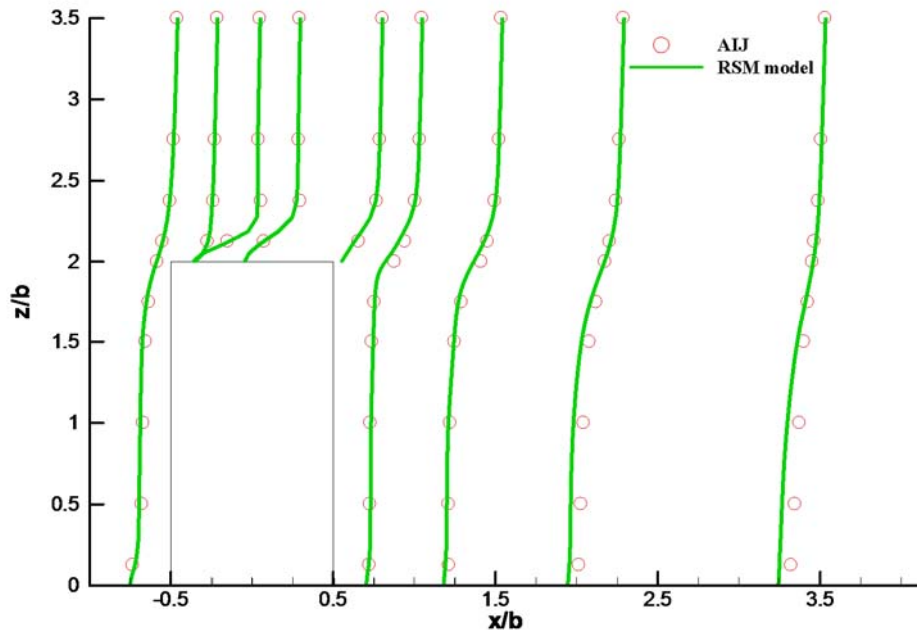


圖 4-13 RSM 平均風速比較(垂直切面  $y/b=0$ )

資料來源：本研究繪製

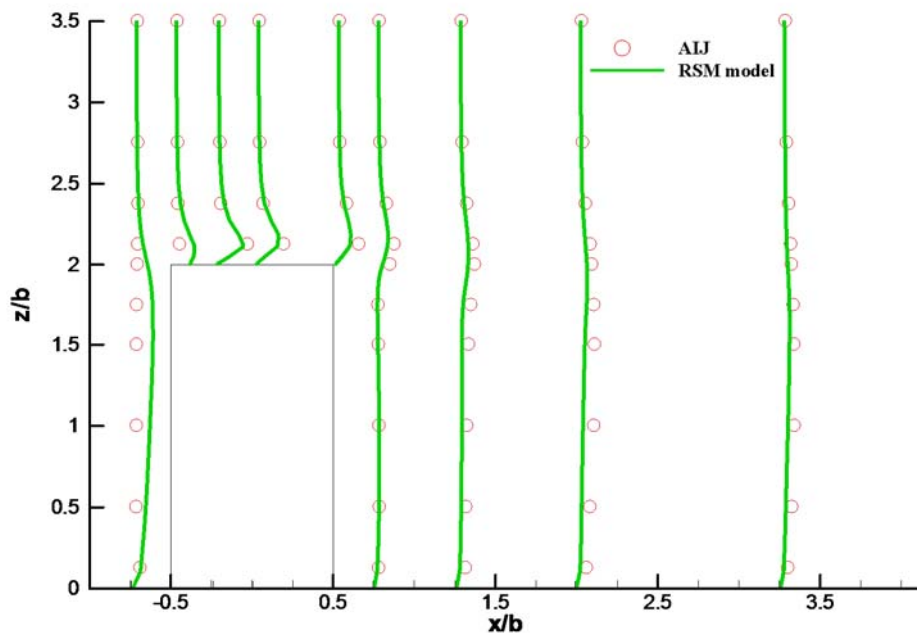


圖 4-14 RSM 紊流動能比較(垂直切面  $y/b=0$ )

資料來源：本研究繪製



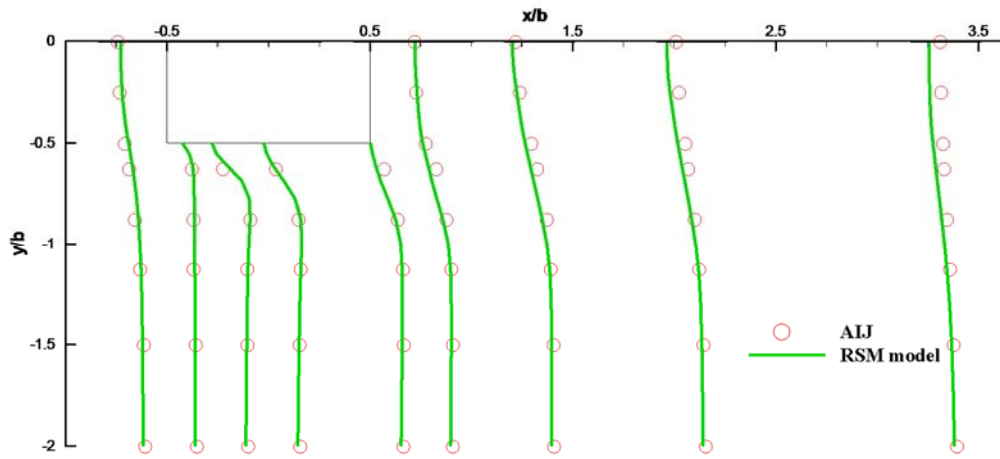


圖 4-15 RSM 平均風速比較(水平切面  $z/b=0.125$ )

資料來源：本研究繪製

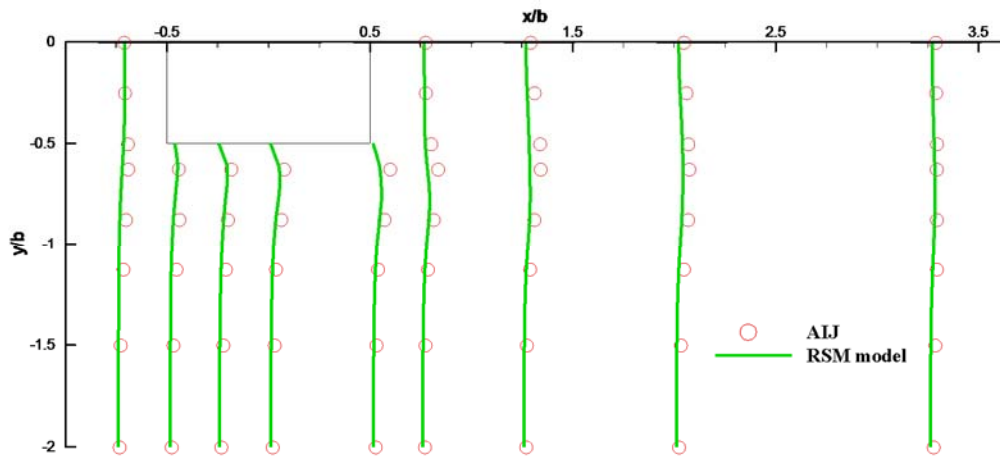


圖 4-16 RSM 紊流動能比較(水平切面  $z/b=0.125$ )

資料來源：本研究繪製

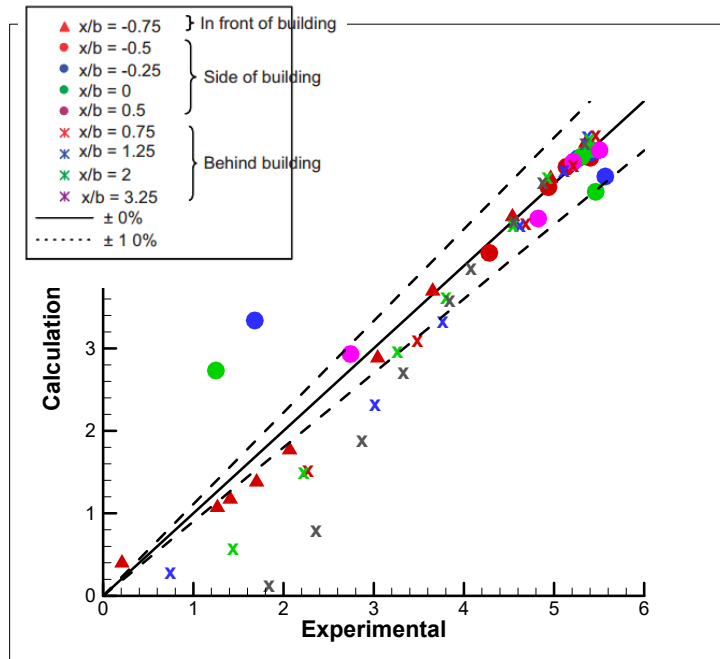


圖 4-17  $k-\epsilon$  model 平均風速誤差分析

資料來源：本研究繪製

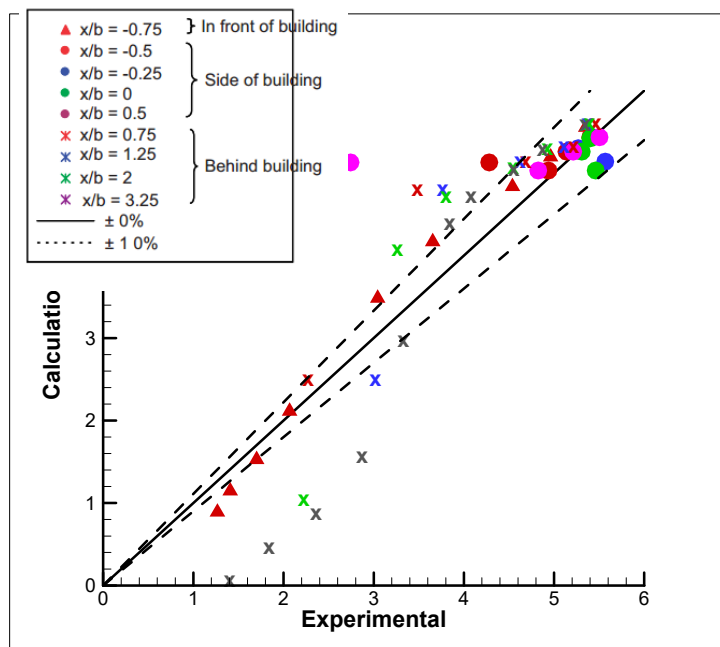


圖 4-18  $k-\omega$  model 平均風速誤差分析

資料來源：本研究繪製

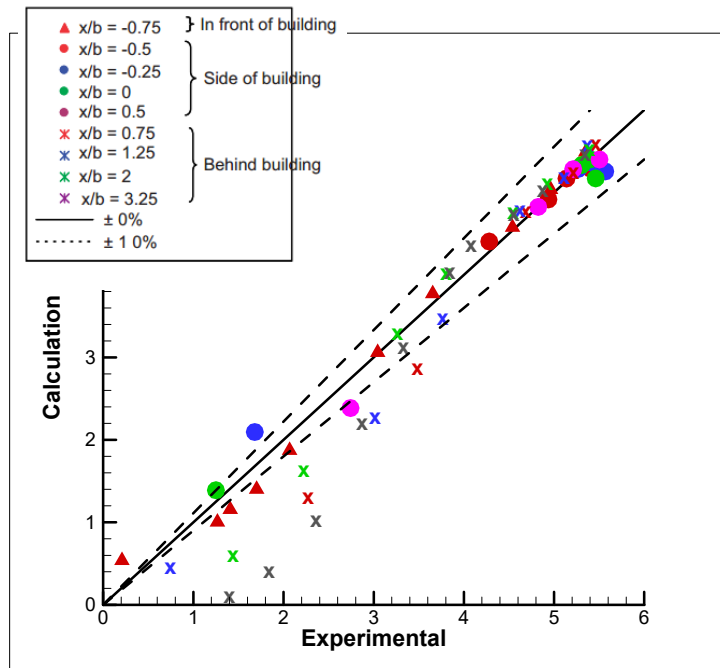


圖 4-19 RSM 平均風速誤差分析

資料來源：本研究繪製

## 二、AIJ CASE E

### (1) 模擬概要

AIJ 驗證範例 CASE E 區域內約有 500 棟左右的建築(如圖 4-20)。案例提供了 3D 建築模型資料，匯入前處理軟體 POINTWISE 後製作網格，格網數量約為 400 萬，行人高度 2 公尺範圍內採用 4 層角柱形網格 (prismatic cells)。佈設的量測點共有 80 個(圖 4-21)。本模擬之入流條件如圖 4-22 所示，依據實驗風速剖面結果迴歸出剖面公式，再寫入 UDF 給定之，模擬邊界條件設定如表 4-2 所示。圖 4-23 為計算區域分配圖，建築群區域為圓盤配置，距離上游為 10 倍外圍最高建築高度(10H；H=13.4 m)，兩側為 10H，下游為 20 倍主建築物高度(20h；h=60 m)，垂直向高度則為 3h。

表 4-2 AIJ CASE E 模擬邊界條件表

|           |   |
|-----------|---|
| 入流邊界條件    | U、k 採用實驗值<br>假設 $P_k=\varepsilon$ 來算出 $\varepsilon$ |
| 分析範圍      | 涵蓋所有的風洞模型範圍   |
| 側面、頂部邊界條件 | Symmetry  |
| 出流邊界條件    | Outflow   |
| 地表邊界條件    | $Z_0$ 型對數律( $Z_0=0.25$ m)                           |
| 建築物表面邊界條件 | Standard wall function                              |
| 紊流模型      | realizable k- $\varepsilon$ model                   |
| 地表        | 離地 2m 處為第 4 個單元                                     |

資料來源：本研究整理

雖然由上節的模擬結果可以得知，RSM 提供了較佳的精度，但於實際建築群較難掌控格網分配，造成收斂困難度提高。故本次模擬採用 realizable k- $\varepsilon$  紊流模型，使計算得以收斂，且精度亦可達到不錯的水準，

於此共模擬 16 個風向角並進行平均風速比較。表 4-3 表示模擬計算所使用之離散方法、求解設定等條件，並說明了格網分配方式。模擬使用 I7 4790 3.6 GHz 之桌上型電腦，採用 4 核心平行運算，每組計算疊代次數約為 800 至 1000 次，時間約為 6 至 8 小時。

表 4-3 AIJ CASE E 模擬參數設定表

|              |   |
|--------------|---|
| 離散方法         | 非結構網格   |
|              | 有限體積法   |
| 對流項          | Second upwind scheme  |
| 壓力解法         | SIMPLEC   |
| 紊流動能、紊流消散率解法 | QUICK   |
| 疊代容許值        | 動量方程 $10^{-4}$<br>紊流動能、紊流消散率 $10^{-5}$  |
| 計算時間         | 約 6-8 小時/1 風向   |
|              | Intel core I7 4790 3.6 GHz *4 cores   |
| 網格解析度        | 使用 Tetra、Pyramid、Prism 元素組合，所有範圍約 400 萬個格網、200 萬個節點。上空最大格網尺寸約 20m，地面附近約 1 m，地面、建築物表面使用 Prism 元素分割為 0.5 m。 |

資料來源：本研究整理

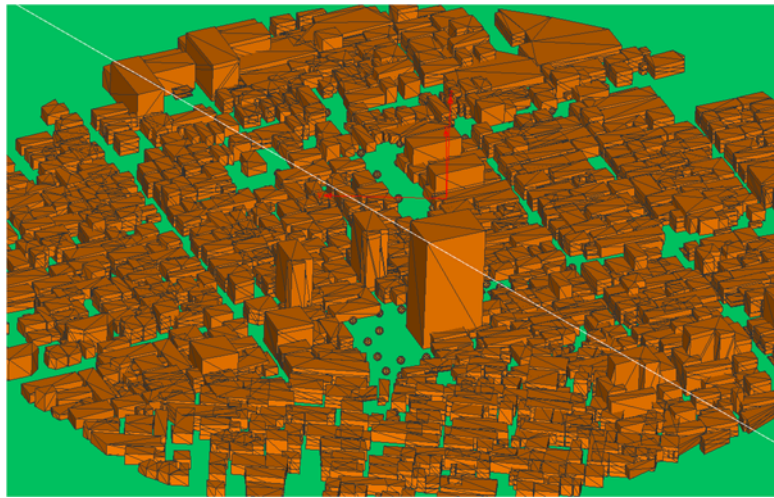


圖 4-20 CASE E 建築群模型

資料來源：本研究繪製



圖 4-21 CASE E 量測佈點

資料來源：[http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm)

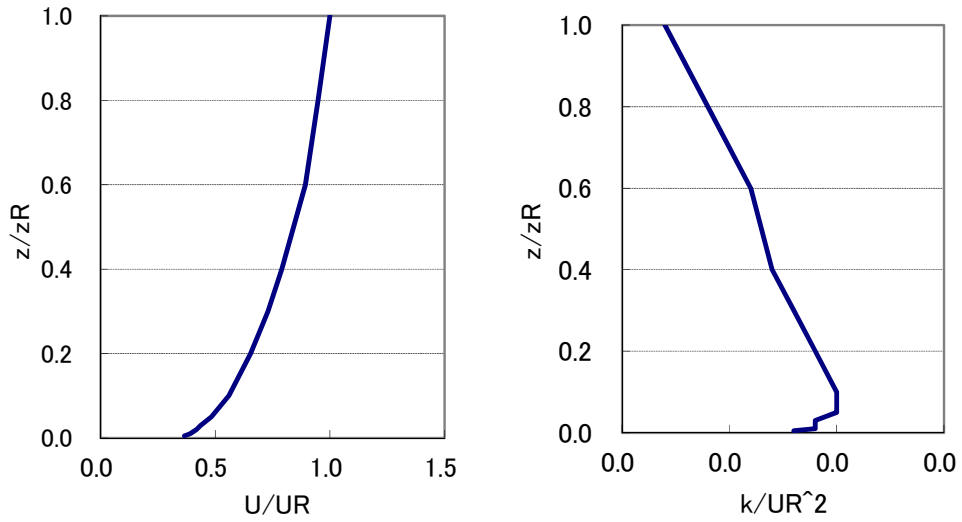


圖 4-22 CASE E 入流風速剖面圖

資料來源：[http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm)

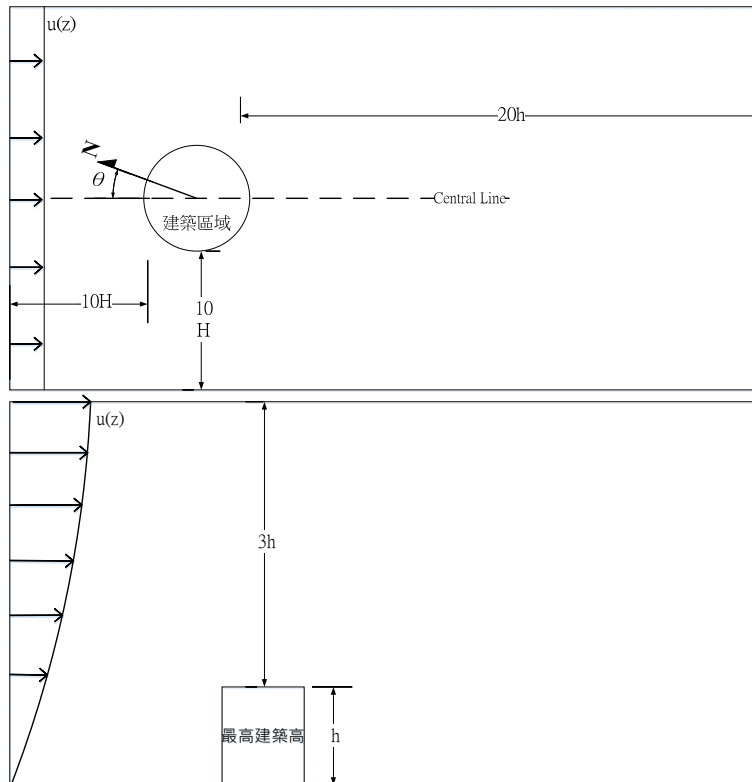


圖 4-23 CASE E 計算域分配圖

資料來源：本研究繪製

## (2) 誤差分析與相關性

在進行實驗與模擬結果比對時，可使用相對誤差來表示，在假設實驗值為真值的情況下，其單點之相對誤差公式為：

$$\text{Error} = \frac{|x - y|}{x} \times 100\% \quad (4-1)$$

其中， $x$  為實驗值， $y$  為預測值。

前述相對誤差在分析行人風環境時，可能會有如後情況：(a)在同樣絕對誤差值(absolute error;  $\text{Error}=|x-y|$ )的情況下，在低風速區的相對誤差會較高風速的結果要放大許多；(b) 將實驗結果視為真值，並未考量實驗本身的誤差。此外，在評估行人環境風場時，強風預測的精度與整體相關性為主要考量。因此，為統一量化指標，避免弱風提高整體預測之誤差值，並參考日本建築學會的分析方式，採用標準誤差分析方法，對於單一風向的所有測點加總其絕對誤差平均後，再統一除以邊界層風速，結果也可以視作無因次風速( $u/U_{\text{ref}}$ )的絕對誤差的平均值。標準誤差公式如下：

$$\text{SE} = \frac{\sqrt{\sum(x - y)^2}}{NU_{\text{ref}}} \quad (4-2)$$

其中  $N$  為測點個數， $U_{\text{ref}}$  為參考風速，於此採用邊界層風速。

另為了解風洞實驗與數值模擬的無因次平均風速之相關性，將各點之平均無因次風速依各風向來計算二者之間的相關性，相關性係數之公式如後：

$$R_{xy} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (4-3)$$



其中， $x$  為實驗值， $y$  為預測值， $\bar{\cdot}$  代表平均值。理論上，相關性係數一般可按三級劃分：

- (a)  $|R_{xy}| < 0.4$  為低度線性相關；
- (b)  $0.4 \leq |R_{xy}| < 0.7$  為顯著性相關；
- (c)  $0.7 \leq |R_{xy}| < 1$  為高度線性相關。

### (3) 模擬結果

圖 4-24、圖 4-25 為 16 個風向角平均風速模擬與風洞實驗量測結果比較。整體看來，預測結果的趨勢與量級大致與實驗相符。雖然測點 55-65 在某些風向角的預測上是低估的，可能是因為尾流區的影響，但在主要預測強風的區域，如東風到西風(圖 4-24)，無因次風速( $u/U_{ref}$ )達到 0.9 以上的測點除少部分略為低估外，大部分仍被有效掌握，其標準誤差範圍在 0.2 以內。

圖 4-26 及表 4-4 顯示模擬結果之風速比與風洞試驗結果的相關性。雖然每種風向在該建築物的尾流範圍內，CFD 的整體預測結果與風洞試驗相比，有稍微低估風速的情況，但其它範圍皆與實驗結果一致。依據 AIJ[7]的說明，CFD 預測結果低估建築物尾流風速的主要原因是因為熱阻風速計的測量值與 CFD 算得的平均風速定義方式不同。各風向所有測點的平均標準誤差為 0.1684，平均速度比為 86%，也就是預測值有低估的狀況。

另由圖 4-27 的相關性係數結果可以得知，各風向的相關性大多落在高度線性相關( $R_{xy} > 0.7$ )，僅於 N、NNE 及 NE 風向屬於顯著性相關( $R_{xy} = 0.57、0.65、0.6$ )，而整體平均相關係數為 0.75，同屬於高度線性相關。

表 4-4 CASE E 各風向標準誤差與相關性係數

| 編號 | 風向  | 標準誤差   | 相關性係數  |
|----|-----|--------|--------|
| 1  | N   | 0.1681 | 0.566  |
| 2  | NNE | 0.1575 | 0.6467 |
| 3  | NE  | 0.173  | 0.6014 |
| 4  | ENE | 0.1682 | 0.7419 |
| 5  | E   | 0.1599 | 0.7907 |
| 6  | ESE | 0.1546 | 0.8185 |
| 7  | SE  | 0.1516 | 0.7955 |
| 8  | SSE | 0.1459 | 0.8163 |
| 9  | S   | 0.1526 | 0.8194 |
| 10 | SSW | 0.1953 | 0.8013 |
| 11 | SW  | 0.1863 | 0.9038 |
| 12 | WSW | 0.1977 | 0.7684 |
| 13 | W   | 0.1895 | 0.7779 |
| 14 | WNW | 0.1802 | 0.7801 |
| 15 | NW  | 0.1567 | 0.7641 |
| 16 | NNW | 0.1586 | 0.735  |

資料來源：本研究繪製

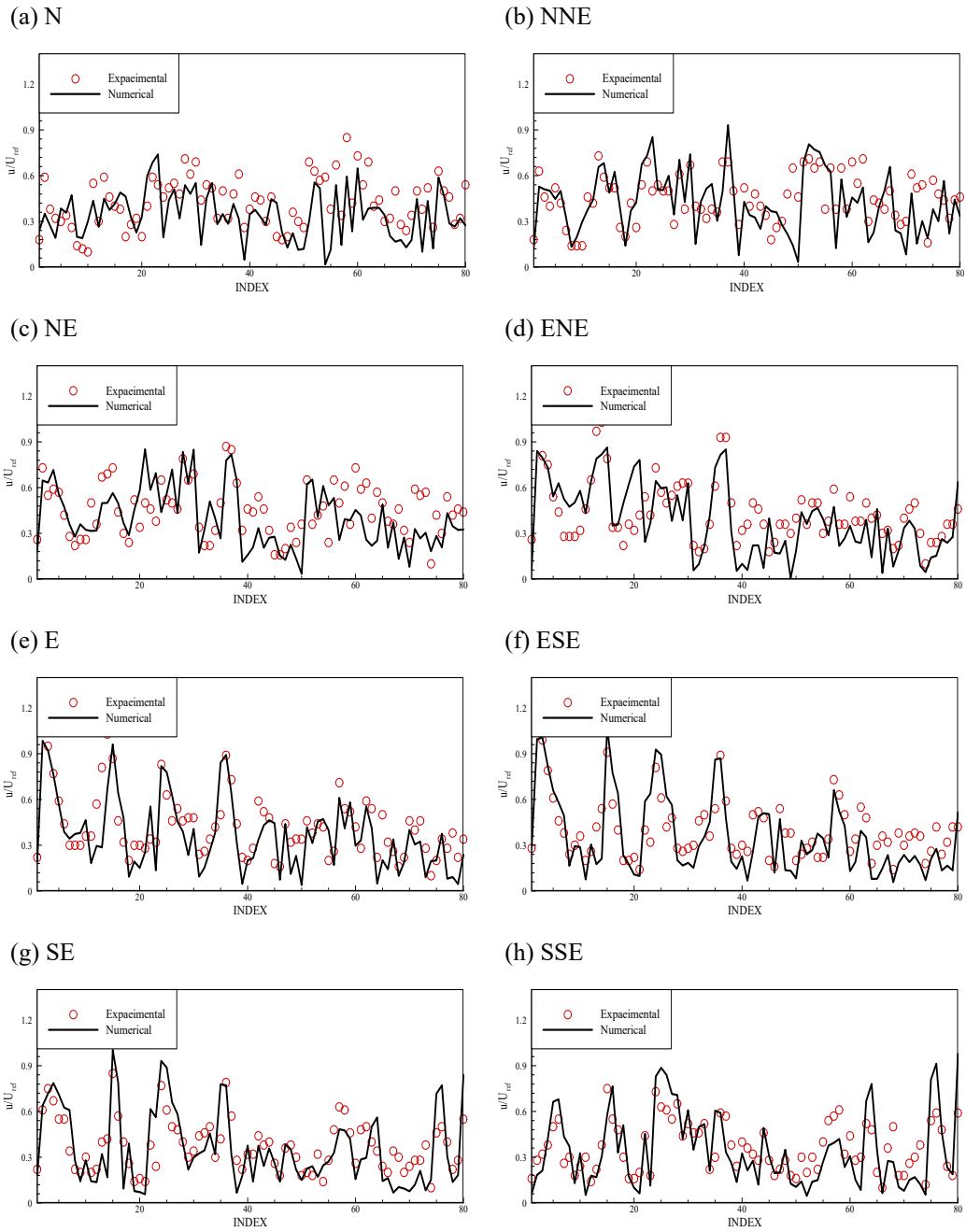


圖 4-24 CASE E 各測點平均風速比較(北風至南南東風)

資料來源：本研究繪製

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

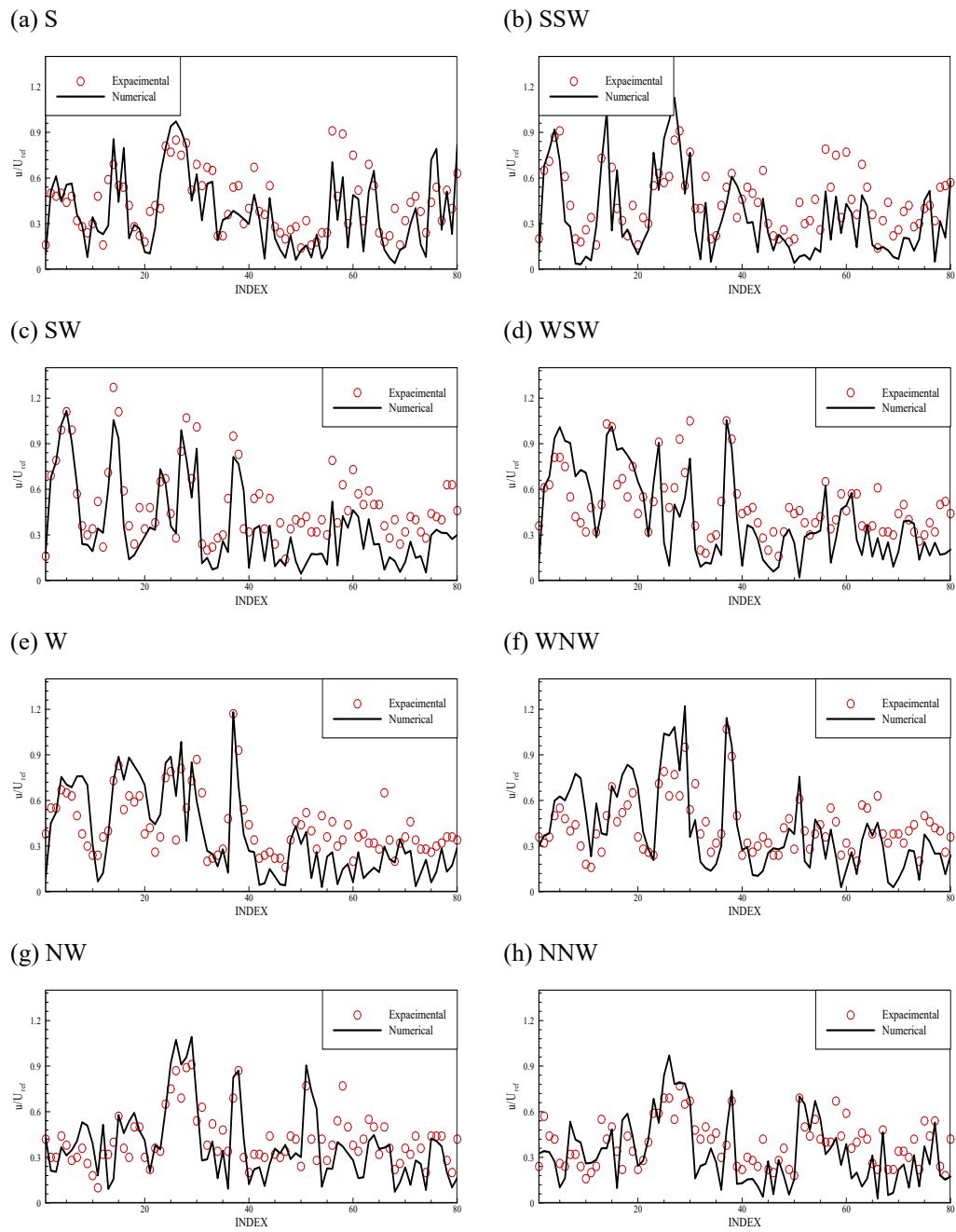


圖 4-25 CASE E 各測點平均風速比較(南風至北北西風)

資料來源：本研究繪製

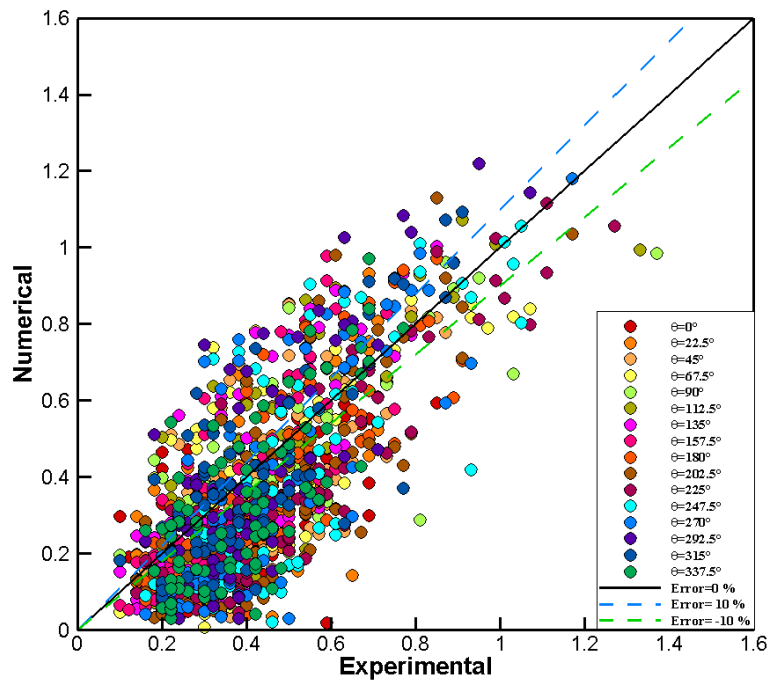


圖 4-26 CASE E 各測點平均風速相關性分布圖

資料來源：本研究繪製

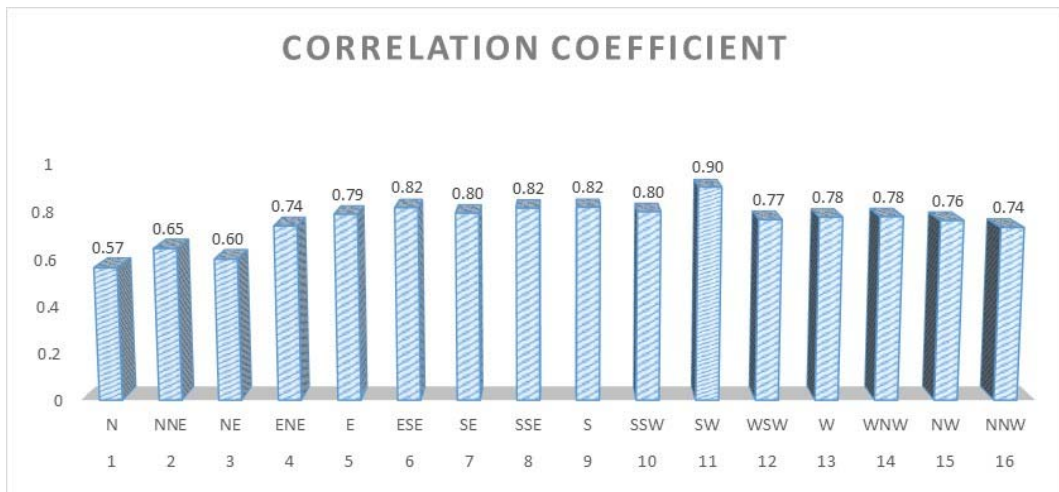


圖 4-27 各風向之相關性係數

資料來源：本研究繪製

由於該區域發生頻率最高的前 2 種風向為 NNE 及 W，檢視這 2 個方向的風速比預測結果，AIJ 以高度 2m 的流入風速(3.474 m/s)為風速比的評估標準。如圖 4-28、圖 4-30 所示，風向 NNE 除了在 A 棟西北邊及東邊的建築物折角處產生風速非常強的區域，在 B 棟與 C 棟之間也因縮流而產生強風。而風向 W 雖然在 A 棟南邊的折角形成強風速區域，但相較於風向 NNE，在巷弄位置的整體風速不大。所有風向在西邊往東北方的大馬路上，風速的局部變化都很大。於此處同時列出本研究所模擬出之 NNE、W 風向等值圖。結果顯示本研究的模擬結果，如強風加速區域、尾流區以及無因次風速量級等流場特性，均與 AIJ 模擬結果類似。

圖 4-29、圖 4-31 分別在 NNE、W 風向下，比較每個測量點的風速比，其中包含了 AIJ 以及本研究的模擬結果。由於 AIJ 模擬結果採用的參考風速為 2m 高位置[7]，而本研究的參考高度則是依據 AIJ 網站所發布之資料([http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm))，參考點高度為 15.9 m，參考風速為 3.77 m/s，層緣風速為 7.8 m/s。因此，本研究所呈現的無因次風速比 AIJ 的結果要來得低一些。

結果看來，無論是 AIJ 或是本研究的模擬結果，CFD 的預測整體上有掌握風洞試驗的特性，特別是建築物附近尾流以外的範圍預測精度相當高。雖然有幾個測量點與實驗結果差異較大（如風向 NNE 的 49 測量點與風向 W 的 31、66 測量點；測量點位置請參照圖 4-21），但是都在離目標建築物較遠的巷弄內。AIJ[7]推測其原因，除了建築物形狀的模擬程度不同，使得預測出的分離剪力層特性產生微妙差異而影響計算結果外，所採用的 CAD 資料與實際的風洞模型之形狀、量測點位置誤差也是主要原因之一。

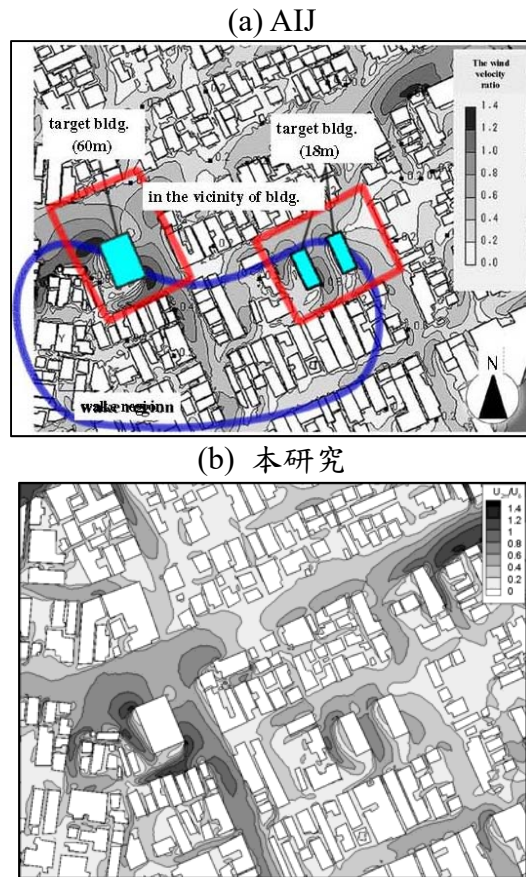


圖 4-28 NNE 風向行人高度風速等值圖比較

資料來源：本研究整理獻[43][46][47]

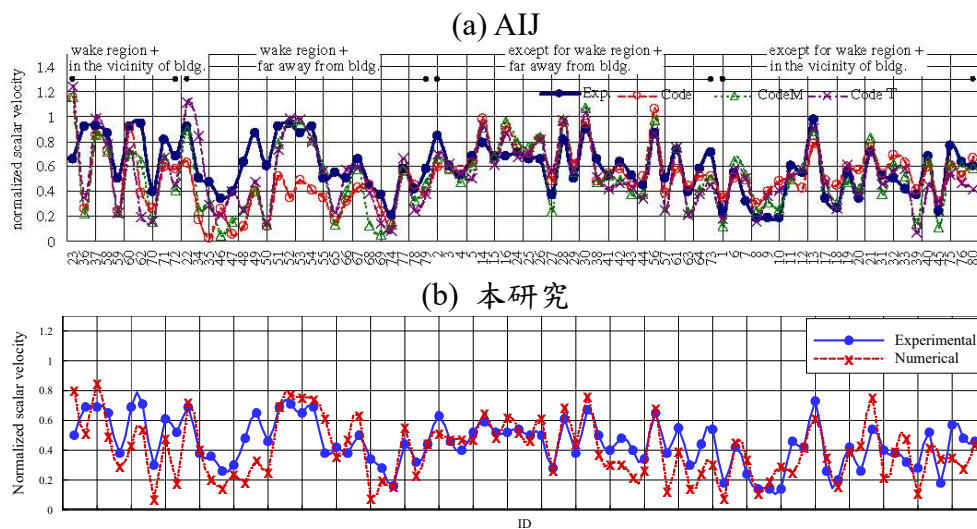


圖 4-29 整合之 NNE 風向模擬結果

資料來源：本研究整理與文獻[43][46][47]



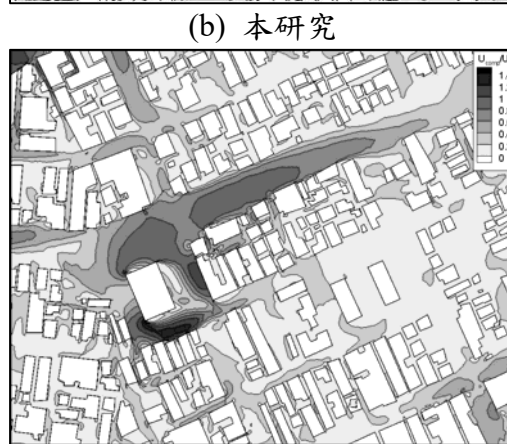
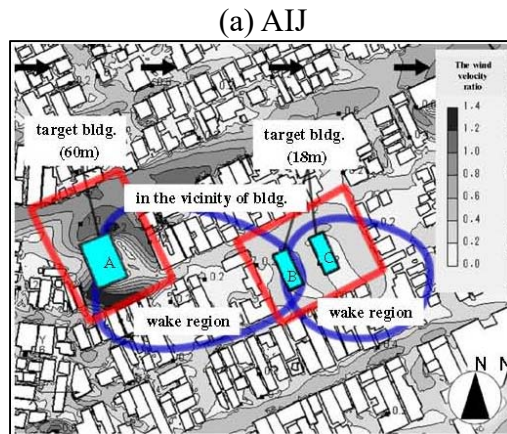


圖 4-30 W 風向行人高度風速等值圖比較

資料來源：本研究整理與文獻[43][46][47]

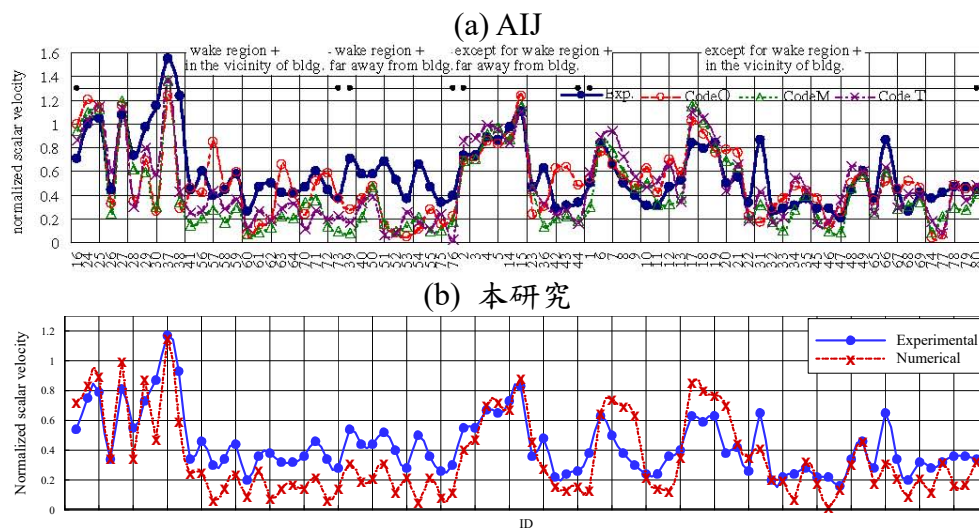


圖 4-31 整合之 W 風向模擬結果

資料來源：本研究整理與文獻[43][46][47]



### 第三節 研究區模擬結果

研究區模擬部分，本研究於風洞實驗中設置了 28 個測點(如圖 3-9)，進行 16 個風向角的量測。研究中首先比較平坦地形之結果，確認數值模式及分析流程後，接著討論加入 DSM 數值地形模型後對行人風環境之影響。

#### 一、模擬概要

研究區模擬圓盤與實驗布置相同，網格製作方式如 3.4 節所述，建築模型以 CAD 資料製作成圓盤區域網格，再向外擴展計算域，以確保計算合理收斂。計算域範圍如圖 4-32 所示，入流至圓盤距離為 9 倍外圍最高建築高度(10H; H=99 m)，兩側為 9H，下游為 20 倍主建築物高度(20h; h=141 m)，垂直向高度則為 7h。入流依據風洞實驗量測結果(3.3 節)寫入 UDF 給定，計算域邊界條件設定如表 4-5 所示。模擬所劃分之網格數量為 800 萬，在使用 Intel core I7 4790 3.6 GHz 的個人電腦運算下，約需 7-9 小時的時間才能達到收斂標準，疊代次數約在 2700-3200 之間。

研究區的模擬參數如標 4-6 所示。基本上，平坦地形與加入 DSM 的扁模型的設定是相同的，對流項選用二階上風法(Second upwind scheme)，最大格網尺寸約 20m，地面附近約 1 m，地面、建築物表面使用角柱元素分割為 0.5 m。

由於研究區加入地表高程時，圓盤區地表面與計算域外圍高程( $z=0$ )並不連續，研究區地形邊緣最高約 7 公尺，需要在交界處做額外處理。研究區中心 980 公尺見方的區域地形建置完成後，如圖 4-33，再延伸 60 公尺的區域做過渡段處理，以免地形或格網變形過於劇烈造成不合理的速度變化、發散或不收斂的情況。經相關研究討論，過渡段坡度應小於 20 度，於此過渡段坡度為 7 度以下，屬於和緩之坡度。

表 4-5 研究區模擬邊界條件表

|           |   |
|-----------|---|
| 入流邊界條件    | U、k 採用風洞實驗量測值<br>假設 $P_k=\varepsilon$ 來算出 $\varepsilon$ |
| 分析範圍      | 涵蓋所有的風洞模型範圍   |
| 側面、頂部邊界條件 | Symmetry  |
| 出流邊界條件    | Outflow   |
| 地表邊界條件    | $Z_0$ 型對數律 ( $Z_0=0.25$ m)                              |
| 建築物表面邊界條件 | Standard wall function                                  |
| 紊流模型      | realizable k- $\varepsilon$ model                       |
| 地表        | 離地 2m 處為第 4 個單元   |

資料來源：本研究整理

表 4-6 研究區模擬參數設定表

|              |   |
|--------------|---|
| 離散方法         | 非結構網格   |
|              | 有限體積法   |
| 對流項          | Second upwind scheme  |
| 壓力解法         | SIMPLEC   |
| 紊流動能、紊流消散率解法 | QUICK   |
| 疊代容許值        | 動量方程： $10^{-4}$<br>紊流動能、紊流消散率： $10^{-5}$                                    |
| 計算時間         | 約 7-9 小時/1 風向   |
|              | Intel core i7 4790 3.6 GHz*4 cores  |
| 網格解析度        | 所有範圍約 800 萬個格網、177 萬個節點。最大格網尺寸約 20m，地面附近約 1 m，地面、建築物表面使用 Prism 元素分割為 0.5 m。 |

資料來源：本研究整理

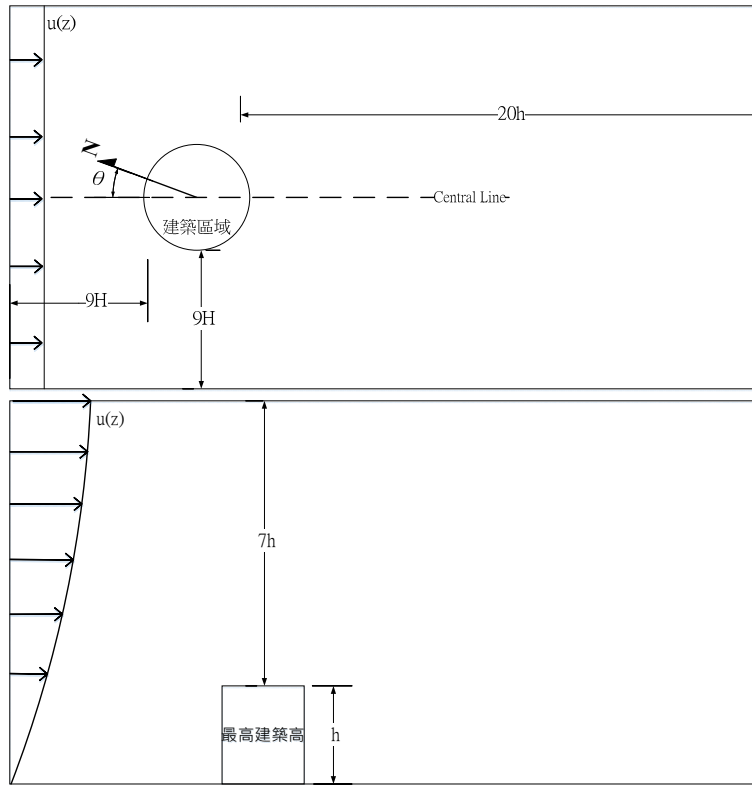


圖 4-32 計算區域示意圖

資料來源：本研究繪製

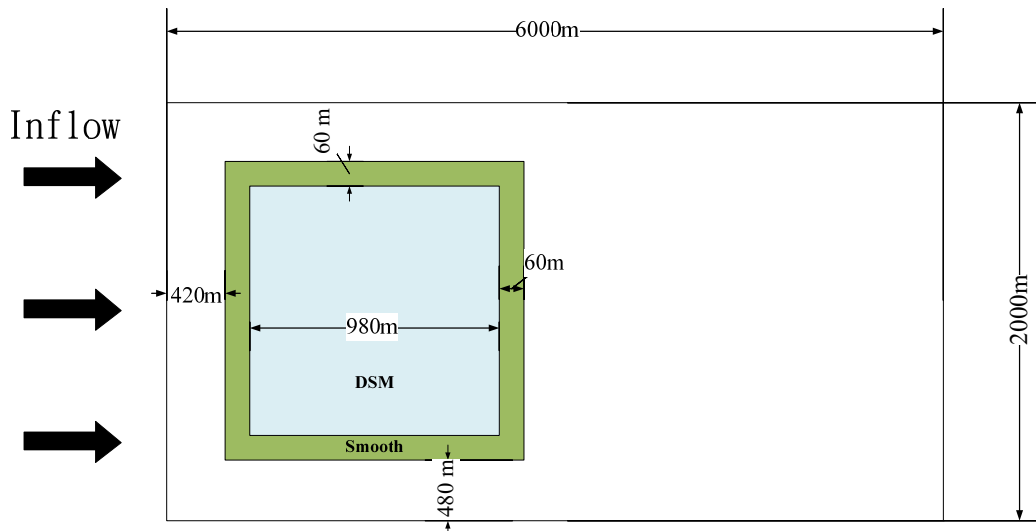


圖 4-33 DSM 表面平滑化示意圖

資料來源：本研究繪製

## 二、風洞實驗結果比較

圖 4-34 表示平坦地形下(不考慮 DSM 效應)各風向下無因次平均風速比較結果。結果發現，雖然本區域高樓林立，但無因次風速並未有超過 1 的狀況，顯見該區域對於行人風環境效應有所關注。整體看來，CFD 模擬結果與風洞實驗結果趨勢相當一致，只是略有低估的現象。表 4-5 顯示各風向之標準誤差與相關性係數，可以看出 NE 風向的結果與實驗值最為接近，標準誤差為 0.092。而標準誤差最大則發生在 SE 風向，其值為 0.171。由實驗與 CFD 結果相關分析(圖 4-35)可以發現，確實有低估的狀況，所有測點的平均風速比為 97%，平均標準誤差則為 0.137。

另由相關性係數結果(圖 4-36、表 4-7)可以得知，各風向的相關性大多落在高度線性相關( $R_{xy}>0.7$ )，僅於 S、SSW 風向屬於顯著性相關( $R_{xy}=0.69$ 、 $0.58$ )，而整體平均相關係數為 0.81，顯示模擬結果高度線性相關於實驗值。

## 二、加入 DEM 模擬結果

在考慮地形效應下，加入高精度數值地形模型 DSM 之表面網格後，各測點的變化並不顯著。與加入 DSM 表面的模擬結果相比，由圖 4-37 可以觀察出，雖然選定的研究區屬於平坦地形，雖然加入實際 DSM 表面後的無因次平均風速變化並不顯著，其平均差異值為 19%。但整體來看，加入地形表面後，大部分測點的無因次平均風速有明顯提升，其平均風速比為 111%，風速平均提升了一成左右。因此，未來在進行風環境模擬時，應適當考慮地形因素以符合現況，合理考量地形的影響。

表 4-7 研究區各風向標準誤差與相關性係數

| 編號 | 風向  | 標準誤差   | 相關性係數  |
|----|-----|--------|--------|
| 1  | N   | 0.1712 | 0.7551 |
| 2  | NNE | 0.118  | 0.92   |
| 3  | NE  | 0.0924 | 0.8475 |
| 4  | ENE | 0.14   | 0.8037 |
| 5  | E   | 0.1282 | 0.7695 |
| 6  | ESE | 0.1472 | 0.8631 |
| 7  | SE  | 0.1715 | 0.7003 |
| 8  | SSE | 0.129  | 0.8387 |
| 9  | S   | 0.1439 | 0.6874 |
| 10 | SSW | 0.1309 | 0.5843 |
| 11 | SW  | 0.1127 | 0.8822 |
| 12 | WSW | 0.1207 | 0.8861 |
| 13 | W   | 0.137  | 0.8787 |
| 14 | WNW | 0.1456 | 0.82   |
| 15 | NW  | 0.1317 | 0.8257 |
| 16 | NNW | 0.171  | 0.8606 |

資料來源：本研究繪製

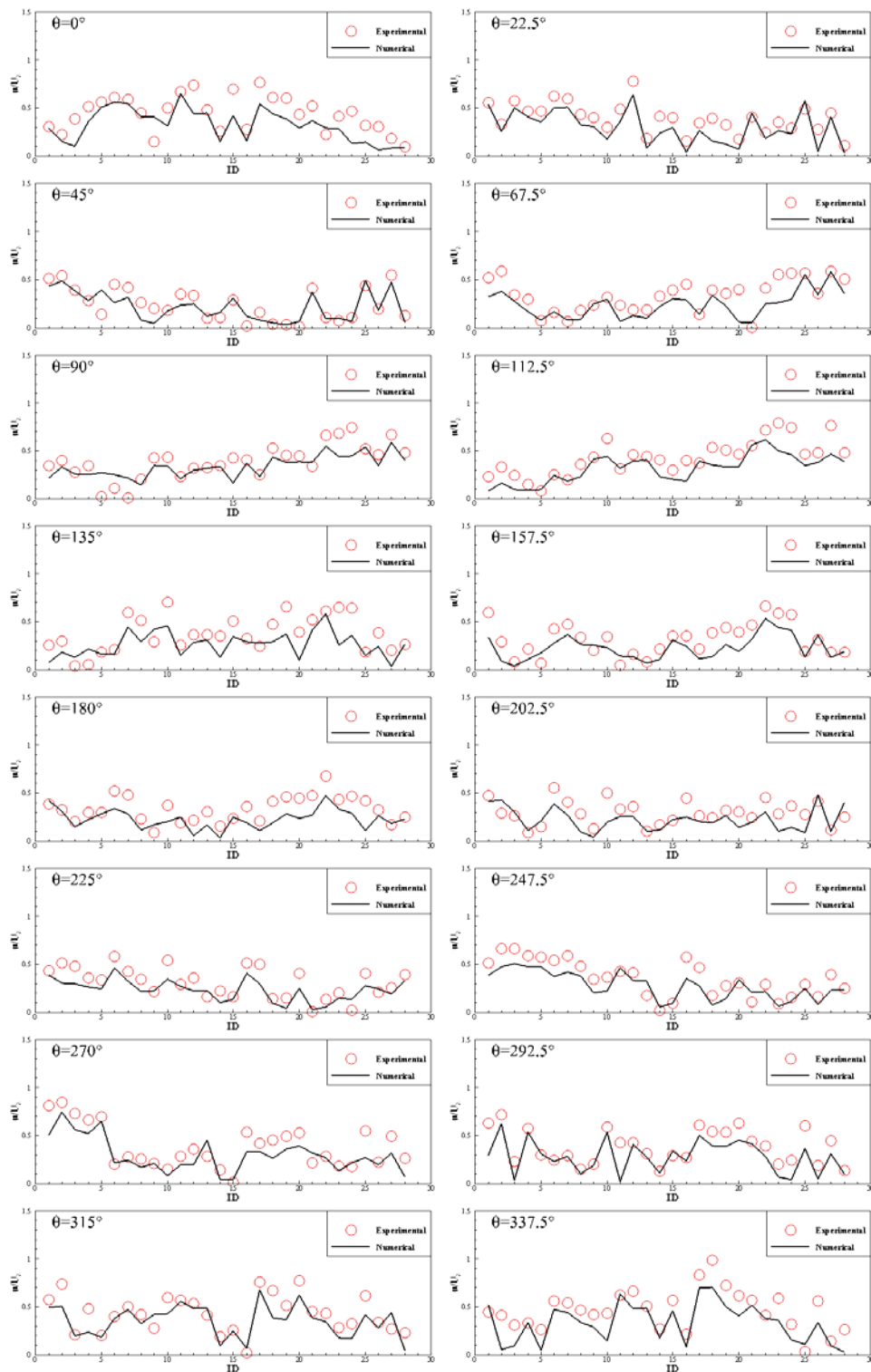


圖 4-34 研究區之不同風向無因次風速比較圖

資料來源：本研究繪製

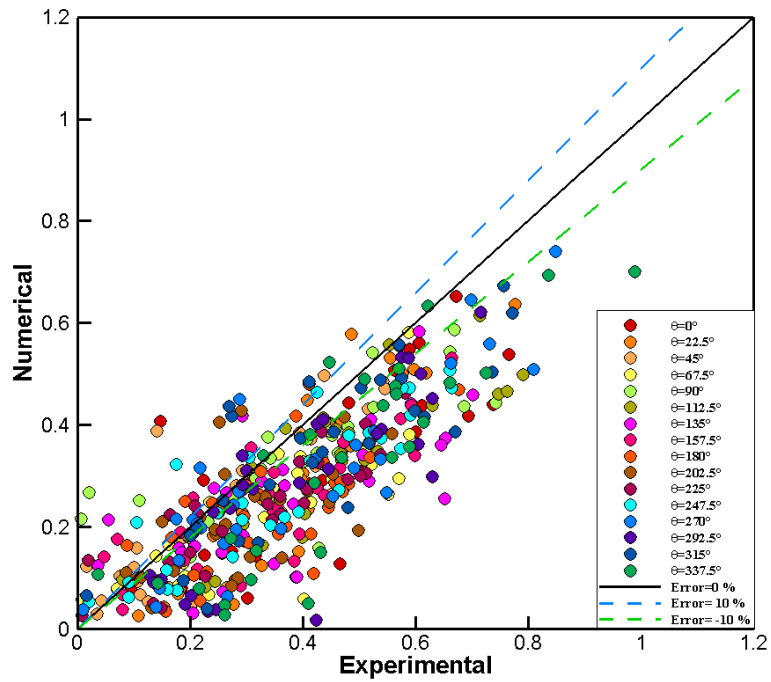


圖 4-35 研究區各測點平均風速相關性分布圖

資料來源：本研究繪製

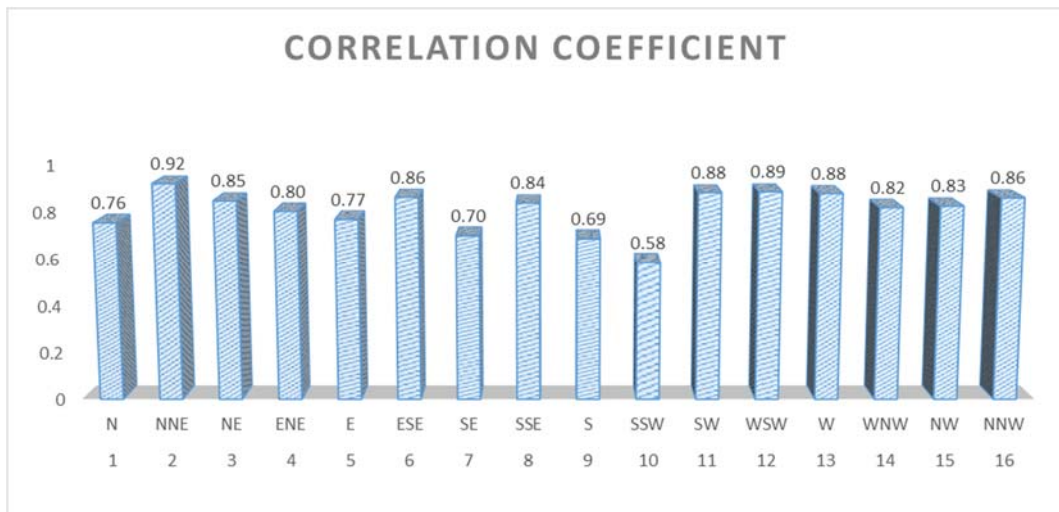


圖 4-36 各風向平均風速相關性係數圖

資料來源：本研究繪製

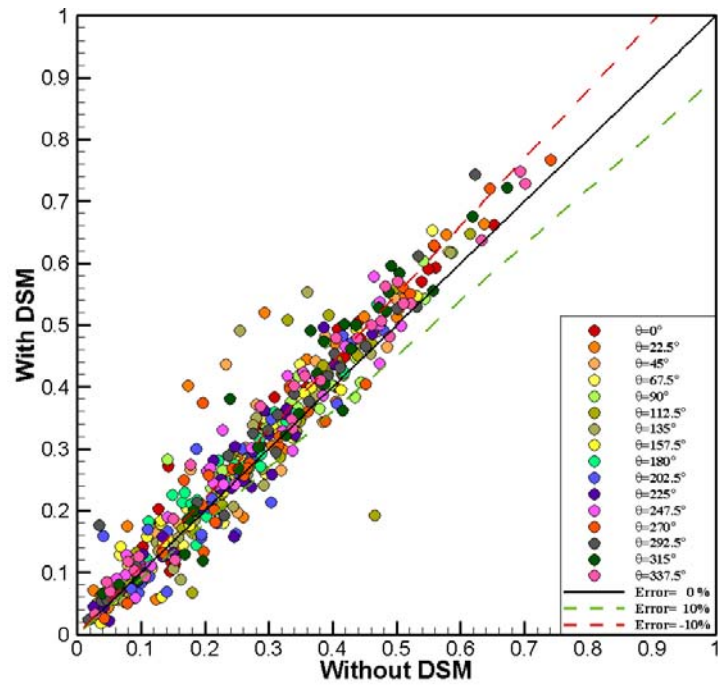


圖 4-37 研究區加入 DSM 後各測點平均風速相關性分布圖

資料來源：本研究繪製



## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

本研究綜合研究成果並檢視預期成果效益後，可歸納以下幾點結論：

#### 一、以 CFD 進行風環境模擬之基本建議

- (1) 透過格網相依性分析，建議於主量體建築單一邊長上分配 10 至 20 個格點，最小網格解析建議為 0.05 倍邊長(0.05D)，以兼顧精度與計算效率。
- (2) 在單柱模擬的紊流模型比較中，RSM 的預測結果是最好的，值得推薦使用。然而，其計算時間是 realizable  $k-\epsilon$  model 的 3 倍，故使用時需適當考量計算能量問題。此外，RSM 模型對於格網形狀相當敏感，若格網偏度(skewness)、伸展率或形狀比(aspect ratio)過大則會不容易收斂。
- (3) 綜合本研究與日本 AIJ 等模擬分析結果，在進行實際都市 CFD 模擬驗證時，如以邊界層風速為參考風速時，建議標準誤差值應小於 0.2，整體相關性係數應高於 0.7。如以其他高度為參考風速時，則可根據模擬地況依指數率換算標準誤差建議值，以確保使用者之 CFD 模式、格網與各項參數設定合乎準則。
- (4) 在進行 CFD 驗證時，建議使用者應將其 CFD 模式套用在至少一個單一高層建築以及至少一個實際都市區域的複合型建築的風洞實驗結果進行比較，並參考第 3 點之標準誤差及相關性係數進行判定後，方能進行後續風環境評估工作。

#### 二、以 CFD 模擬行人環境風場，作為本所實驗室相關檢測能量。

本研究以 CFD 模擬風環境並與風洞實驗量測進行比對，結果具有不

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

錯的吻合度。雖然數值模擬部分結果有低估的現象，但其結果與實驗值呈現良好的線性相關，平均相關性係數均在 0.7 以上，標準誤差均在 0.2 以下。如經過適當修正後，導入合理的風環境舒適度評估準則，數值模擬應可成為評估行人環境風場的良好工具，唯須遵循相關準則進行，以確保模擬的可靠度。所建立之技術可提供建研所實驗室進行風環境評估工作，提升實驗室檢測能量。

### **三、草擬環境風場數值模擬準則，供環評審查或都市設計審議之參考。**

大體上來說，日本(AIJ)與歐洲規範(COST)之規定大同小異，本研究以日本 AIJ guideline 為骨幹，綜合部分 COST 條件，並經國內 CFD 相關學者建議後，修正部分條文以適於本國國情，草擬出環境風場數值模擬準則，並詳列於附錄三，提供給環境影響評估或都市設計審議參考。

### **四、於 CFD 模擬考量實際地形因素**

本研究所選定的研究區屬於平坦地形，在加入實際 DSM 表面後的無因次平均風速變化並不顯著。但整體來說，大部分測點的無因次平均風速有明顯提升。故就安全性考量，模擬時應適當納入地形因素，以符合現地之風場狀況。

## 第二節 建議

根據研究結果，茲提出建議如後：

### 建議一

辦理高精度數值地形模型應用 CFD 模擬之教育訓練：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦單位：社團法人中華民國風工程學會

本研究以新北市新板特區為研究區，運用高精度數值地形模型資料導入風環境模擬計算，並由平坦地形風洞實驗結果驗證數值模式精確度。研究中所採用之 CFD 模擬技術可作為未來進行 CFD 行人風環境評估方法與程序之重要參考。此技術可透過教育訓練課程讓相關人員學習，提升 CFD 知能，以順應逐漸轉變的風工程研究主流方向。

由於實際都市及地形變化繁雜，在考量更貼近實際模擬建築物理環境，伴隨著模擬尺度與物理變數(風速、輻射、溫度、汙染物、溼度等)的增加，近年來分析建築微氣候特性之研究也越來越細密，使得計算量的需求也隨之提高。此外，大範圍都市的微氣候模擬也是國際上持續研究的課題。在日本，為了模擬整個東京市的風環境所提出的計畫，網格數量甚至來到了 1 億個，顯見進行建築 CFD 模擬的計算能量也需要大幅提升。

除了軟體技術的提升外，建議可針對硬體—高速運算技術(HPC)進行同步提升，以因應未來硬體的需求。讓 CFD 模擬技術與風洞實驗相輔相成，持續開拓風工程研究。

### 建議二

推廣環境風場數值模擬準則：中長期建議

主辦機關：社團法人中華民國風工程學會

協辦單位：內政部建築研究所

近年來由於電腦硬體與效能之大幅提升，以數值模擬方法取代風洞試驗進行問題之分析已逐漸形成一個趨勢。除了可以大幅節省許多金錢與時間的付出外，並可以獲得更為完整且詳盡的變數動態資料以供設計評估之所需。因此，以數值計算來模擬空間中流場變化分布的研究成為另一種符合經濟性及實用性的選擇。然而，在進行行人環境風場數值模擬時，需審慎處理相關參數之設定，否則將造成模擬之失真或導致不合理之環境風場模擬結果。因此，推廣環境風場數值模擬準則確有其必要性，建議可辦理相關講習會推廣準則。

### 建議三

未來課題建議：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

綜合本研究結果，建議未來課題如後：

#### (1) 以數值模擬評估建築風載重之技術準則

相較於其他紊流模型，LES 紊流模型模擬對於評估建築風力及風壓特性具有較優秀的結果，但大量的計算時間使得工程應用上難以實現。此外，非恆定入流風速的給定也是一大挑戰。近年隨者計算機能量增加，高速平行運算技術能力的提升，將 LES 應用至建築載重評估得以實現。

風載重模擬需要透過建築受力歷時資料、頻譜分析等資料來找出設計極值，但基於 RANS 模式之紊流模型是無法正確評估出結構受風時之設計極值，而 LES 方法則可合理的呈現此一效應。日本建築學會於 2005 年初步擬定建築風載重 CFD 模擬之準則(AIJ-GWL[8])，並持續進行相關修訂研究。建築受風作用時，對於入流的紊流影響是相當敏感的，因此非恆定紊流邊界層條件的給定十分重要。故在入流非恆定風速給定研究，從早期循環法、前導資料庫法等演進至近年更多學者關注並投入研究之隨機紊流產生法，大幅改善了入流之紊流強度、長度尺度、紊流頻譜能量衰減以及空間相關性等問題。

因此，建立以數值模擬評估建築風載重技術，提供業界合理的評估技術準則，以有效提升建築耐風設計能量，提供產業界可靠之模擬標準，可增進對國內風工程與產業界之貢獻。

## (2) 複雜地形風場模擬評估研究

台灣為位於亞洲與太平洋交界處之島嶼，島上之地形豐富而多變化，其中山地及丘陵約占了全島總面積之三分之二，而隨著都會區的發展及人口密度的增加，於土地的利用逐漸往丘陵與山坡地發展。受到地形之影響，於山地或丘陵坡地中之風場形態會與平地有所差異，風會隨著地形之起伏變化產生加速或者是減速的現象，甚至風向也會受到影響而發生改變，其風場之複雜程度會隨著地形變化之程度增加。

目前我國規範所規定之風速剖面僅有平坦地形下包含都市、市郊與平坦 3 種，另針對簡單形態之丘陵地形進行風速剖面修正，國外規範同為類似之修正方式，在特殊複雜地形狀況下並無法適用。在實務上，風洞實驗中若要合理考量複雜地形效應，需要納入大範圍的地形模型，縮尺效應相對增大，造成風洞模擬可能會有失真的狀況。此外，地表植被所造成的粗糙度模擬，在風洞縮尺實驗中重現難度相當的高。相較於風

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

洞實驗，CFD 能在無縮尺效應下進行模擬，如能配合本研究所發展之數值地形模型格網建置技術應用至 CFD 風場模擬，精確掌握複雜地形對於風場之影響，彌補風洞實驗的不足，將可合理修正風速剖面，無論對於規範修正或是加強風洞實驗之模擬以及量測上的不足處，皆會有正面之幫助。

## 附錄一 採購評選會議意見回應

| 項次 | 審查意見  | 研究團隊回應   |
|----|---|--|
| 1  | 請說明高精度地形模型之定義？  | 數值地形模型(DTM)指的是表示地表高程面的一個數值模型，世界上絕大多數國家的測繪界均改用數值高程模型 (Digital Elevation Model 簡稱 DEM) 此一名詞來代替DTM。早期的格網解析度為40 m×40 m，由於衛星航照及光達技術發達，現已有5 m×5 m以下之高精度數值地形。 |
| 2  | 請補充說明為何選擇用 Fluent、Tecplot 作為數值模擬的研究方法？是否尚有其他方法？擬採用數值模擬器之優點為何？     | 本研究選用 Fluent 主要原因在於，其相關參數及模式有著透明的給定方式，並有完整之理論說明，且其屬於泛用型流體力學軟體，有利於後續模式之擴展應用。其他 CFD 軟體如 STAR-CD、FLOW-3D 等，可經由熟稔 CFD 人員操作完成本研究之準則。                        |
| 3  | CFD 風場模擬係希望將來能以數值模擬取代部份風洞試驗，但本計畫須用到高速電腦，其未來推廣應用性如何？               | 本研究為分析相關參數於 CFD 模擬試驗之影響，在比對分析 AIJ 及風洞試驗資料時需要修正參數以進行不同模擬個案，數量頗多。而在工程應用上僅需針對單一個案進行即可。  |
| 4  | 計畫書第22頁全程計畫列為105年2月~105年12月，但其他相關期程均為12月個，兩者是否相符，能否如期於105年12月底結案。 | 本案期程為105年1月至105年12月，並能如期於105年12月底結案。   |
| 5  | 本案以新北市政府為本次模擬區域，是否可能將以往之風洞試驗成果，再以數值模擬比較其正                         | 以往實際之風洞實驗成果為新建大樓進行環評時的評估結果，此部分受限委託單位的商業機   |

|    |   |  |
|----|---|--|
|    | 確性。   | 密，較不方便公開資料。  |
| 6  | 請論述 CFD 風場係針對強風或弱風問題。   | 本案主要針對大樓興建後所可能產生之強風進行評估。   |
| 7  | 建立地形模型除 CAD 外，可否採用其他軟體。   | 地形模型建立軟體除 CAD 外，亦可採用 Sketchup、Rhinoceros、ProE 等常被採用之 3D 建模軟體來進行，再將模型匯出成 igns 檔即可。                                |
| 8  | CFD 模擬與風洞試驗比較如何建立修正參數。  | 本研究首先比對 AIJ 的 6 個實驗案例，參照國外相關準則，確立相關模式及參數。爾後進行之風洞實驗比對亦透過相同的方式進行參數修正。  |
| 9  | 本案題目提及「高精度數值地形模型」。請補充本研究預定進行之「高精度」是到達何種程度？與以往之差別為何？   | 數值地形模型早期的格網解析度為 40 m×40 m，由於衛星航照及光達技術發達，現已有 5m×5m 以下之高精度數值地形。  |
| 10 | 本服務建議書提及目前日本已有 70% 以上的工程評估案均以 CFD 來完成，表示仍有 30% 是採風洞實驗方式評估。請問是否有某些狀況無法採用 CFD 來評估？其困難點為何？請舉例說明。 | 由於日本有相關 CFD 準則可以依循，因此有關風環境評估大多數採用 CFD，但仍有部分學者或從業人員對於風洞實驗結果較為信任。而建築風力風壓部分則是因為精度考量，在工程應用上計算量無法負荷，此部分風洞實驗還是較佳的解決方案。 |
| 11 | 進行 CFD 模擬評估，會不會因為不同的模擬軟體而形成評估結果差異很大？本研究案內容是否包括此部分的探討？   | 一般計算流體力學軟體所內建之求解方法以及紊流模型等差異性並不大，但在一些如格網解析及型態、收斂條件等人為控制部分須熟悉該軟體者來操作以得到較佳之結果，本案目前以本團隊熟稔之軟體 FLUENT 來進行。             |



|    |  |  |
|----|--|--|
| 12 | 本研究案選擇以新北市政府大樓為研究標的，是否有特別的理由或目的？                             | 研究區選定除考量現有大樓密集區外，高度在 140 公尺左右的建築，達到需要進行環評或都審之標準，綜合以上特性而採用新北市政府大樓作為研究區。 |
| 13 | 若 CFD 模擬評估結果與風洞試驗結果比對，發現差異甚大，該如何檢討？                          | 將從數值模式參數及風洞實驗量測精度兩個部份來檢討。  |
| 14 | NASA 開發的 Pointwise 網格製作軟體請加以說明，並說明其可供哪些 CFD 軟體使用。            | Pointwise 軟體所製之網格，可供市面上絕大部分的商用軟體來使用，亦可提供自行開發之 CFD 程式碼應用。               |
| 15 | 建議針對環評中行人風場採數值分析之基本準則加以研擬內容。                                 | 將草擬 CFD 模擬行人風環境之準則。  |
| 16 | 如何建立分析結果的驗證機制。   | 此部分需與相關主管單位討論後擬定，本年度計畫擬著重於技術之建立以及草擬準則。                                 |
| 17 | 資料蒐集費建議依本所擬定額度編列，並於 3 個月內應該執行 80% 以上，且將購得相關文獻、資料或圖書於結案前送回本所。 | 遵示辦理。  |
| 18 | 請蒐集並統計分析環評及都市計畫中有關行人風場問題的執行情形再以典型案例專案表達。                     | 國內風環境評估工程案數等資訊將修正於計畫書中。  |
| 19 | 資料建立要有可行及實用性，以免流於形式，致缺乏具體且務實之結論。                             | 遵示辦理。  |
| 20 | 國際使用情形，簡報未完整敘述，請於計畫書內補充論述。                                   | 國際使用情形將補充於計畫書中。  |
| 21 | 請說明高精度地形模型的定義及取得來源。  | 數值地形模型早期格網解析度為 40 m×40 m，由於衛星航照及光達技術發達，現已有 5 m×5 m                     |

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

|    |                            |  |
|----|----------------------------|--|
|    |                            | 以下之高精度數值地形。擬洽詢內政部地政司國土測繪中心取得相關資料，由於高精度數值地形模型屬於列管資料，屆時請建研所協助發文申請。 |
| 22 | 簡報中的預期成果僅為效益，但具體成果為何則未見說明。 | 本案擬建立可信之 CFD 模擬風環境之技術，並草擬 CFD 模擬行人風環境之準則供相關單位參考。                 |

## 附錄二 期中審查意見與回應

| 審查委員   | 審查意見   | 研究團隊回應  |
|--------|--|---|
| 胡總監銘煌  | 有關名詞定義，DTM (Digital Terrain Model) 數值地形模擬僅在文中第一次陳述時有加上英文說明，但對於報告書第 2 頁 CFD 卻無相關解釋與說明，請補充以利讀者閱讀。    | 將於期末報告中補充說明。  |
|        | 採用計算流體力學 (CFD) 來預測高樓風力及評估環境風場，具有實用價值。但如何達到所須精度乃是關鍵，除與風洞試驗結果比較外，應有其他比對方式，宜詳加說明。                     | 除了風洞實驗外，實場量測亦是其中一項選擇。但其來風無法控制，對於模擬比對需要更多的資料處理，將於期末報告中詳述之。       |
| 張總經理清雲 | 風場模擬計算後，除能瞭解風環境外，應須瞭解此風環境在工程力學之影響。換言之，如何轉換為風力並研判是否因風環境變化而高於規範值，將有利工程師對於環境造成額外風力的考量，並強化標的物的設計強度。    | 本研究主要模擬重點為行人區域之風環境，如要進行建築物風力評估，須採用精度更高的紊流模型，並採用非恆定分析，計算時間將大幅增加。 |
|        | 未來若 DTM 的精度提升，例如改採 1m×1m 地形模型時，CFD 是否應重新模擬？如是，該如何因應？   | 本研究所建立之流程可因應各種解析度之數值地形模型，並建置適用之數值模擬網格。                          |
| 莊技師忠鵬  | 本案若能確認數值模型進行 CFD 風場模擬的確可行，將可減少風洞試驗所需耗費經費與時間。   | 採用 CFD 評估行人風環境可大幅降低風洞的人力物力成本                                    |
|        | 本案係將 DEM 與建築物數值模型整合，該程序先將建築物模型建置，再轉成 IGES 後，採 Pointwise 軟體整合，此方法對於使用者的似乎較為不便。是否可使用 LIDAR 直接求得數值模型？ | 現有 LIDAR 量測之資料包含，引入 CFD 計算時會發生建築表面不平整之狀況，不符實際。                  |

|        |   |  |
|--------|---|--|
|        | 報告中所得風洞試驗結果與數值模擬結果仍有差異，是否可說明差異主要的原因為何？  | 於期末報告中加強說明。  |
|        | 由於報告中僅驗證一個風洞試驗結果，是否也可選取 1 至 2 個過去所進行之風洞試驗結果，進行模擬與驗證比對？                            | 本研究選擇之研究區有進行風洞實驗比對，經增補於期末報告中。  |
| 陳建築師鵬欽 | 文中有甚多 DTM、DEM、CFD、DSM... 等用語，建議於專章專節先予說明。   | 將修正於期末報告書中。  |
|        | 風洞試驗所需耗費成本、時間、人力均較高，目前得知日本已漸漸採用 CFD 來評估工程案，如能以 CFD 取代風洞試驗，且能得到近似滿意的數值分析結果，將為一大進步。 | CFD 已逐漸成為風環境評估工作之主要工具。   |
|        | CFD 若與風洞試驗結果有差異時，應探究原因，以利改進分析方法。  | 將於期末報告詳細說明之。   |
| 楊教授宏宇  | 有關數值高程模型應考量植被及人工構造物，若採用粗糙度係數代入，可否增加數值地形模型的精確度？                                    | 在微氣候分析上，風場主要受控於建築群量體，此時平衡邊界層公式已無法真切描述風場特性，若以壁函數 (wall function) 加上粗糙係數來修正地表處風速，可能會造失真。 |
|        | 數值地形模型在 Z 方向 (垂直方向) 座標標定及計算風場時，應可依粗糙度及高層建築物的形狀等參數，納入 CFD 模擬，對於風場與風壓的反應較為真實。       | 在大尺度模擬問題，格網解析度較粗的情況下，或採用 nest 模擬方式，可利用本方法得到不錯的結果。但在微氣候分析時，應                            |
| 林技師增吉  | 建議增加專有名詞資料庫。  | 相關名詞將統一解釋於   |

|         |  |   |
|---------|--|---|
|         | 本案網格解析度是多少？請詳細說明。  | 研究區模擬案例之最小網格解析度為 0.5 公尺，將於期末報告中詳細說明。                                      |
|         | 建議於報告書第 5 頁增加研究流程圖。  | 將於期末報告中加入。  |
|         | 目次及本文第三章之第四節順序有誤。  | 已修正。  |
|         | 建議將風洞試驗內容部分獨立章節說明，並顯示成果。   | 期末報告將呈現風洞實驗結果。  |
|         | 建議將 CFD 內容獨立章節說明。  | 納入期末報告參考。   |
| 陳副研究員玠佑 | 有關 DTM 如何與 CFD 軟體結合（如讀取、匯入等程序），應加強說明，較符本案原目標。  | 將於期末報告中補強說明。  |
|         | 不採用本部國土測繪中心資料之原因為何？除了該中心所提供的 5mx5m 精度仍屬粗糙外，是否能具體描述原因？  | 建築物模型無法採用國土測繪中心資料，主要是因為建築物外型的輪廓線無法精準描述，製作建築量體時將無法呈現平整面，不符實際狀況，對於網格製作相當不利。 |
|         | 有關初步結論所提 RSM 解析能力優於 k- $\epsilon$ ，能否提出於何者尺度或情況，適用何種演算模擬模式，採較具體方式說明，以供讀者瞭解。                    | 將於期末報告中補充說明。  |
| 郭副研究員建源 | 本案主要探討高精度數值地形模型 (DTM) 如何導入 CFD 內進行都市區域之風場模擬研究，惟報告書對於如何應用 DTM 於數值模擬技術尚無完整說明，建議應將相關技術詳載於報告書內，俾供參 | 增加流程說明於期末報告書中。  |

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

|       |  |   |
|-------|--|---|
|       | 考。   |   |
|       | 研究提及目前文獻有關 CFD 模擬準則包括紐澳、歐洲及日本等國，惟報告書僅針對日本 AIJ 準則進行比對討論，其他國家準則亦應納入討論。                       | 草擬之準則已同時參考比較 AIJ 及歐洲規範 COST。  |
|       | 報告書附錄已有 CFD 模擬準則草案，但於內文未見相關論述，建議就 CFD 模擬所應遵守之相關細節，包括：網格切割技術及精度與運算時間如何取捨、紊流模式採用何者方能適用都市風場等。 | 增補相關資訊於期末報告書中。  |
| 何所長明錦 | 有關坊間 Google Earth、LIDAR 或航(空)照圖能否與 CFD 直接套用？未來應用的層面、精度與便利性為何？                              | 經與測量相關專家聯繫討論，建築量體雖可透過相關資料來建置，但其精度仍有待提升，且仍需要人工判斷。故建築模型部分，採用縣市政府建置的數值圖檔應是較佳的選擇。 |

### 附錄三 專家座談會意見與回應

| 審查委員  | 審查意見   | 研究團隊回應   |
|-------|--|--|
| 李教授宗霖 | 數值模擬結果的誤差似乎偏高？平均誤差有的達到 50%，如何修正？   | 將嘗試 1.低風速區(尾流區)分離進行誤差分析;2. 加密網格或分配方式調整，據以修正結果。 |
|       | 建議修正實驗與 CFD 結果的比較指標，呈現較佳的吻合度。  | 除了誤差值外，將另外尋找合適的比較指標，呈現合理的模擬準確度。                |
| 吳教授毓庭 | 模擬時，入流風速剖面給定後，至受測區域是否仍維持其原本特性？   | 在同一格網解析度下，進行空流場分析，確保風速剖面至受測區不至於衰減。             |
|       | 誤差值過高問題，建議可將高風速與低風速誤差分析分開處理。   | 感謝建議，將朝本方向進行修正。                                |
| 羅教授元隆 | 由於本計畫案在目的動機上來說，應是希望於未來建議給出一套準則，作為工程界進行 CFD 數值模擬的原則，因此必須特別小心在軟體的選擇上具有普遍性及準確性。 | 感謝建議。  |
|       | 相關係數的計算採用的數據來源為何？可否簡單解釋。   | 將於期末報告中補述。                                     |
|       | AIJ 準則有無判斷準確性的依據？在本次研究中可否把弱風區跟強風區的區別找出並分別計算準確性的依據，以做為未來納入建議的方案。              | 後續將參考 AIJ 自行模擬結果，並將強風區分離討論，探討合理的誤差分析。          |
| 林教授文欽 | CFD 模擬準則提到紊流模型的給定，標準應放寬一些，讓使用者依所需狀況及功能性採用適合的紊流模型。                            | 將調整準則條文撰寫方式。                                   |

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

|              |   |   |
|--------------|---|---|
|              | <p>應限縮風環境模擬準則應用範圍及對象。</p>                                     | <p>準則使用對象為風環境評估相關人員、環評或都審委員，提供 CFD 評估時參考。</p> |
|              | <p>建議將發生誤差的原因列出，進行不確定度分析。</p>                                 | <p>將列出可能發生誤差之原因。</p>                          |
| <p>張教授正興</p> | <p>建議實際建築群模擬格網解析度再加密，除確定格網相依性並提升精度，應可增加與實驗之間的吻合度。</p>         | <p>將朝加密格網來提升模擬之正確性。</p>                       |
|              | <p>有關 AIJ case E 的模擬部分，建議本研究模擬結果可參考 AIJ 自行模擬比較之結果，確認其合理性。</p> | <p>將參考 AIJ 自行模擬結果，確認模擬結果之合理性。</p>             |



### 附錄四 期末審查意見與回應

| 審查委員   | 審查意見   | 研究團隊回應  |
|--------|--|---|
| 王技師亭復  | 本研究應可為風環境評估的參考。  | 感謝肯定。   |
|        | 進行風環境評估是否有具體數值標準？請補充說明。  | 於成果報告補充誤差容許標準建議。  |
|        | 第 IX 頁之「附錄三」應為「附錄四」，請修正。   | 已修正。  |
| 林理事長志憲 | 格網分析尺寸效應 (X-Y dire-mesh) 及精度差異為何？數值模擬與風洞實驗量測結果，雖有其一致性及良好的線性相關，但選定的研究區屬於平坦地形，模擬結果卻略低估實驗值。後續若能對於起伏地形進行研究，是否可於地形變化點設置必要量測比對條件，例如網格尺寸或採多邊形網格，以得到較近真實之數值模擬，才能評估其風場變化。 | 感謝建議，後續將朝複雜地形風場模擬進行研究，將數值地形模型模擬技術應用得更廣泛。                |
|        | 本計畫欲以數值計算來模擬空間中流場變化以符合經濟性及實用性的選擇，其中涉及相關 CFD 參數設定。建議依案例分析於不同地形之參數設定建議值，以供環境風場模擬參考。  | 於成果報告中增列各案例模擬參數。  |
|        | 後續應用環評時之價值與必要性為何？請補充說明。  | 目前已有部分業者於環評時提出 CFD 模擬報告，於此部分應有適當的準則供參，以確保模擬的品質，將成果報告敘明。 |

|       |   |   |
|-------|---|---|
| 胡總監銘煌 | 本案以 CFD 模擬建築風環境與建築物，並與風洞實驗結果比較，應可取代風洞試驗，效益很大，希望進一步將研究成果，如模擬準則、參數選用等具體作法，提供業界參考。 | 建議建研所推廣模擬準則。                                      |
|       | 希望能將 CFD 取代風洞實驗之方式彙編為規範。  | 可建議建研所持續推動此一目標。                                   |
| 莊技師忠鵬 | 建築物形狀對模擬的正確性應有一定影響，本研究對此是否有加以探討？  | 比對驗證之模型圖面於風洞實驗和 CFD 中                             |
|       | 數值模擬本來易受精度影響，精度與計算時間無法兩全，本研究是否有建議的精度？   | 於成果報告中提出誤差建議。                                     |
|       | 本案研究結果顯示，在建築後方下游處的結果略有誤差，是否與形狀突然變化有關？有無可能在變化點增加精度來克服？                           | 建築下游處誤差主要應是紊流模型對於尾流區的預測會有低估的狀況，可藉由選擇更高精度之紊流模型來改善。 |
| 陳科長威成 | 本計畫成果可作為環境影響評估及都市設計之評估，確有實益，建議未來可增加強風造成影響舒適性之研究。                                | 感謝建議。   |
|       | 採用數值模擬取代風洞試驗，可省時省錢，如擬納入現行規範條文，應有完整的條文內容及分析軟體，以利技師遵循。                            | 持續與建研所方面研議將 CFD 模擬條文納入規範中。                        |
| 林教授子平 | 本計畫「應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬」詳述了以數值模擬結合高精度數值地形模型之完整的技術，並提供完整的參考數據及模擬意見，符合本計畫之目標。  | 感謝肯定。   |
|       | AIJ 之案例於本計畫及台灣案例之應用性，請說明是否有其限制性。  | AIJ 與本研究所採用之研究區案例均於，主要用於模式驗證。                     |

|             |   |  |
|-------------|---|--|
|             | 文內首次提到 LES 的模式時應詳述。   | 將於成果報中補充說明。  |
|             | 第三節研究區模擬結果僅有一頁之描述，建議研究團隊再多討論描述。                                   | 於成果報告補充說明，。  |
| 陳組長建忠       | 報告書內容有研究課題建議，依時程須納入後(107)年度課題參考，而所列兩議題到底於國內外進展及研究重要性為何？請補充說明。     | 將補充於成果報告。  |
|             | 建議一與結論相同，而且本研究已完成建立 CFD 模擬技術。另建議二第六行僅提「須審慎處理相關參數之設定」，這似乎與推廣無法連結。  | 修正文字說明於成果報告中。  |
|             | 文字宜有關聯性，如報告書第 34 頁倒數第二行「…將其轉換成。」，後面就沒有陳述，請修正。                     | 已補充疏漏之文字。  |
|             | 本案所提 5mx5m DTM 資料是否為目前精度的極限？                                      | 為進行大範圍之含地形之建築群模擬，本研究採行國土測繪中心公開提供之全面 DTM 資料，其精度為 5mx5m，其它個別單位所自行測繪之局部資料則不在考量之列。 |
| 郭副研究員<br>建源 | 研究報告中應將研究過程所獲良好結果直接納入結論中，例如網格數的多寡，紊流模式的選用等，如何選用才能達到最佳效能，且能符合模擬目標。 | 於成果報告補充。   |
|             | DTM 資料為列管資料，本案結束前應以函文繳回，俾利本所執行銷毀工作。                               | 在計畫完成後，將依規定繳回國土測繪中心所列管的 DTM 予以銷毀。  |
| 陳副研究員<br>玠佑 | 所提模擬與風洞實驗結果比對，值得參考。惟能否提具體誤差範圍值？應可作為後續研究或評估時，檢核其正確性。               | 於成果報告中提出誤差建議。  |

|                     |  |  |
|---------------------|--|--|
|                     | <p>以 RSM 模擬在低風速或近建築物時，會有較大變化的原因為何？可否分區塊格網設定，以減低其變異性。</p> | <p>近建築物風速區域據判應是尾流區影響，主要是因為基於 RANS 假設之紊流模型，雖然 RSM 模型已修正部分缺陷，但低估現象仍無法避免。</p> |
|                     | <p>未來 DTM 精度若提高，應用本研究之方式與程序是否會有影響？</p>                   | <p>所建立之地形網格技術流程，於模型解析度提升後亦可適用。</p>   |
| <p>鄭主任秘書<br/>元良</p> | <p>對於 CFD 用於戶外型模擬的經驗與歷史較不如用於室內模擬，如何提高精度與正確性，應優先考量。</p>   | <p>除了提升格網解析度外，另可考慮較高精度之紊流模型。</p>   |
|                     | <p>結論建議提及軟體認證，是否已具備相當條件？此涉及推廣應用的效益與優先性。</p>              | <p>本研究所提出之 CFD 模擬準則目前僅針對環評或都審於風環境評估時參考，目前尚未考量認證工作。</p>                     |
|                     | <p>對於採用 16 個風向結果來進行模擬與討論，16 個風向氣象資料設定是如何決定的？請補充說明。</p>   | <p>本研究 16 個風向之風速資料乃蒐集板橋測站於 2004 至 2014 年間之統計值。</p>                         |

## 附錄五 環境風場數值模擬準則(草案)

在進行行人環境風場數值模擬時，需審慎處理相關參數設定，據以模擬出可靠之環境風場結果。目前日本(AIJ guidelines)與歐洲(COST)規範已有相當完備之模擬風環境評估指針，針對利用 RANS 進行風環境數值模擬時應注意之各項環結，皆有詳盡的規範與建議。

隨著近來年電腦的高速化與流體分析軟體的普及，實務上漸漸開始廣泛運用計算流體力學(CFD)來預測高樓風及評估環境風場。為了讓 CFD 專業人士能夠妥善地預測、評估高樓風，特別整理出需要留意的要點。

在進行風環境 CFD 模擬時，若要獲得精確的分析結果，最好能夠使用 LES 或低雷諾數型式的紊流模型，但也需耗費龐大的計算時間。因此，要將這類模型運用在實務分析上，即使是現在的電腦運算能力，一般而言也相當困難。畢竟實務上預測高樓風時，必須將周圍眾多的建築物群納入計算範圍中，因此要分割出大量的網格，並分成許多的計算案件(許多的風向、建築物建設前與建築後、採取因應措施後)，且一般而言時間相當有限。此外，LES 還必須施加適當的入流非恆定風速，且需要統計非恆定變動之分析結果，在運用上並不容易。故本要點主要建議使用的是以高雷諾數  $k-\varepsilon$  模型為主的 RANS 模型來進行分析，於可接受的精度範圍下進行風環境模擬。

### 一、周遭建築之建置

- (1) 在實際都市區域中，評估區域中的建築必須詳細建模。一般而言，評估區域約為目標建築之半徑  $1-2H$  ( $H$  為主建築物高度) 範圍。
- (2) 評估區域內每個方向至少有一個附加的街廓必須清楚呈現。
- (3) 建議在處理建築叢集時使用簡化的外型，或是在地表邊界條件定義

合適的粗糙長度  $Z_0$  去呈現外部區域(由附加街廓的外緣到計算域邊界)的粗糙度。

## 二、小於格網尺寸的障礙物

- (1) 為了模擬如小型建物、路標、樹以及移動車輛等小尺度障礙物的氣動力效應，必須在基本流體方程式中增加附加項，用來降低風速且增加紊流。
- (2) 披覆物模型(canopy model)乃基於  $k - \varepsilon$  model，並在傳輸方程式中加入源項(source term)。
- (3) 源項乃基本控制方程式應用空間平均推導而來，採用體積片段(volume fraction)技術，主要為考慮小於格網尺度的障礙物對於流體影響的簡化技術。
- (4) 在行人風環境改善方法中，植栽是最常用的手段，在使用任何樹木披覆模型時應比較適當的實驗結果。

## 三、格網離散

- (1) 為了在可接受的精度下預測建築周圍流場，正確的表現靠近建築屋頂與壁面的分離流特性是極重要的工作，因此角隅區域流場解析需要細密的格網配置。
- (2) 近建築表面的黏滯次層(viscous sub-layer)一般來說是非常難以解析的，同時也很難在壁面上採用不可滑動條件。之前許多壁函數(wall function)係對數律(logarithmic law)在考慮附屬於邊界層流狀況下所發展而成的，因此在建築周圍使用 wall function 來描述流場基本上是不正確的。
- (3) 許多具有銳緣的建築與鈍形體因分離點總是落在銳緣處，故無因次的流場結果與雷諾數無關。在這些狀況下，採用壁函數將會使精度降

低。

- (4) 建築物單邊至少需要 10 個格網來呈現迎風角隅周遭所發生的分離流。
- (5) 格網形狀應被適當設定，使其與鄰近建築以及地表面邊界的格點寬度較小，特別是在風速梯度很陡的區域。在這些區域中，建議將其鄰近網格伸展率設定為 1.3 或更小。此外，應確認流場結果不再隨格網之不同而改變。
- (6) COST 建議在格網伸展率部分有著與 AIJ 相同的限制，同時建議應該測試格網解析的敏感度結果。

#### 四、主建築解析度

- (1) 最小格網解析度應設定約為建築尺寸的 1/10(約為 0.5-5.0 m)，涵蓋範圍應包含目標建築周圍評估點區域。
- (2) 格點應適當排列，使得評估高度(地表以上 1.5-5 m)落在距離地表上第 3 或更高位置。

#### 五、格網相依性

- (1) 在不同粗細之格網系統下，需要確認預測結果沒有明顯變化。
- (2) 在測試格網相依性時，細密網格在每個方向的數量至少是 1.5 倍粗網格的數量。

#### 六、非結構化網格處理

- (1) 在某些區域如鄰近粗網格或複雜幾何外型的表面，必須確保格網形狀比值(aspect ratio)不能過高。
- (2) 為了改善精度，建議在地表邊界處的格網進行柱體網格(prismatic cells，圖 A1)規劃。

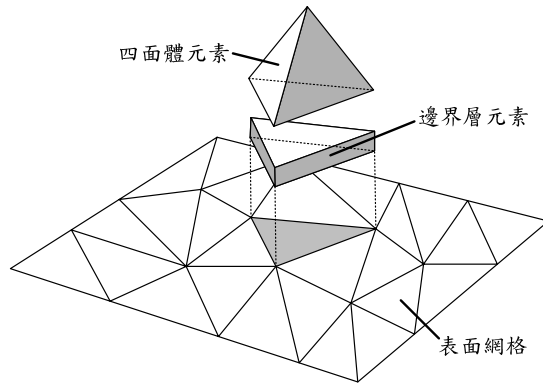


圖 A1 地表邊界處的柱體網格規劃示意圖

## 七、入流邊界條件

使用者可依模擬區域給定適當之入流邊界，或參考下列公式給定之，但必須確認風速剖面至受測區域不會有明顯的衰減或變形。

### (1) 平均風速

可參考 AIJ 方式依指數率給定，其公式為：

$$\frac{u}{U_{\delta}} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (\text{A1})$$

其中指數  $\alpha$  及邊界層厚度  $\delta$  依地況特性給定之。

或參考 COST 建議之 log law 形式，其公式為：

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_0}{z} \right) \quad (\text{A2})$$

$$u^* = \frac{\kappa U_h}{\ln \left[ (h + Z_0) / Z_0 \right]} \quad (\text{A3})$$

其中  $\kappa=0.4$ ， $Z_0$  為粗糙長度， $U_h$  為參考高度  $h$  之風速。

### (2) 紊流動能

使用者可自行選定可信之紊流強度剖面經轉換後得到紊流動能，可參考 AIJ 之建議式：



$$I(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)} = 0.1 \left( \frac{z}{\delta} \right)^{(-\alpha-0.05)} \quad (\text{A4})$$

$$k(z) \cong \sigma_u^2(z) = [I(z)U(z)]^2 \quad (\text{A5})$$

或參考 COST 之紊流動能建議式：

$$k(z) = \frac{u^{*3}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (\text{A6})$$

其中， $C_\mu$  為常數，建議值為 0.09。

#### (4) 紊流消散率

依據自保固(self-preservation)理論，AIJ guideline 建議，在邊界層中假設紊流消散率  $\varepsilon$  與產出(production)項相近，故其給定方式如後：

$$\varepsilon(z) \cong P_k(z) \cong -\overline{u'w'} \frac{dU(z)}{dz} \cong C_\mu^{1/2} k(z) \frac{dU(z)}{dz} \quad (\text{A7})$$

當速度梯度分佈以指數率表示時紊流消散率可簡化如後：

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{U_s}{\delta} \alpha \left( \frac{z}{\delta} \right)^{(\alpha-1)} \quad (\text{A5})$$

或參考 COST 建議如後公式：

$$\varepsilon(z) = \frac{u^*}{\kappa(z+z_0)} \quad (\text{A8})$$

### 八、外側邊界條件

- (1) 計算域應設定足夠大之範圍，使得兩側與上側表面的邊界條件對於目標建築周圍的計算結果不會有顯著的影響。
- (2) 在大計算域中，使用無滯性(inviscid)邊壁條件(正切速度分量的垂直速度分量與垂直速度梯度設為零)能使計算更為穩定。

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

- (3) 在出流邊界建議給定垂直梯度為零之邊界條件。
- (4) 出流邊界必須設置於遠離目標建築使得影響可忽略之區域。

### 九、實際複雜建築群之地表設置

- (1) 應使用符合實際地表的邊界條件，如和平滑地表面，平滑壁面的對數率公式(A6 式)即可使用

$$\frac{U_p}{(\tau_w/\rho)^{1/2}} = \frac{1}{\kappa} \ln z_n^+ + A = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{(\tau_w/\rho)^{1/2} z_p}{\nu} + A \quad (A6)$$

其中， $\kappa$  為 von Karman 常數，建議值為 0.4。下標 P 代表邊界上第一個格點相應之物理量。

- (2) 在粗糙地表則可以粗糙長度  $Z_0$  來表示，可應用包含粗糙參數的對數率公式(如公式 A7)。

$$\frac{U_p}{(\tau_w/\rho)^{1/2}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z_p}{z_0} \right) \quad (A7)$$

- (3) COST 指出使用  $k_s$  之粗糙壁面條件會導致流體在接近固體邊界會有非常差的解析結果，此因近地表的第一個計算節點應該設位於地表至少 1 個  $k_s$  的距離內。

### 十、紊流動能與消散率之固體邊界設置

- (1) 紊流動能：解傳輸方程式時須採用其正向梯度為零之設定。
- (2) 紊流消散率：採用如後公式：

$$\epsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa z_p} \quad (A8)$$

### 十一、演算法與空間離散

- (1) 如果計算中非恆定擾動現象沒有發生且充分收斂，使用 RANS 方法

無論在恆定與非恆定計算應得到相同的解。

- (2) 在實際狀況下，非恆定週期性擾動通常在高層建築後方。這種週期性擾動基本上與紊流不同，並且無法在恆定流計算中重現。雖然採用非恆定計算，這種週期性擾動亦無法呈現在許多高雷諾數形式的  $k - \epsilon$  model，當採用更精準的紊流模型和邊界條件時則可能重現。在這個例子中，由於解隨著時間變化，因此必須計算每個變數的時間平均值。
- (3) 當流場變數的空間梯度變得容易引致大的數值黏滯度時，一階上風法(first-order upwind scheme)並不適用於所有傳輸量計算。

## 十二、解的收斂

計算中可經由輸出特定點變數或整體計算域物理量的統計指標，確認在不同計算步中的計算結果是沒有變化是非常重要的。由於軟體廠商希望加強計算效率，故大多數的商業軟體中收斂門檻容許值(tolerance)預設較高。因此，模擬時必須要求更高的收斂容許值來確認計算結果保持穩定。

在計算過程中，常發生發散或收斂緩慢之狀況，其原因可能為：

- (1) 格網的形狀比(aspect ratio)與伸長比(stretching ratio)過大；
- (2) 矩陣求解器的鬆弛係數(relaxation coefficient)過小；
- (3) 週期性擾動如渦散(vortex shedding)現象發生。

## 十三、紊流模型

- (1) 採用 standard  $k - \epsilon$  model 的問題常為無法呈現在建築屋頂的分離(separation)和逆流(reverse flow)，並導致建築表面的碰撞區的紊流動能高估現象。

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

- (2) 相較於建築屋頂區域，紊流動能高估問題在近地表面區雖然不太常發生，但此問題可能會影響預測之精度以及預測之高風速位置。
- (3) 一些修正過的  $k - \epsilon$  models 和 DSM 模型(differential stress model)可以緩和 standard  $k - \epsilon$  model 的問題，並提昇近地表強風區的預測精度。
- (4) 使用者亦可選用高精度之紊流模型或 LES、DNS 等非定常分析方式來提升預測精度，唯其非恆定入流邊界需經確認無誤。

#### 十四、初始條件

為了快速獲得收斂結果，應給定適當物理特性之初始條件(initial condition)。一般常採用入流剖面延伸套用至整個計算域，或者以層流計算結果作為初始條件。

#### 十五、CFD 模式驗證

使用者應使用他們的 CFD 模式套用在至少一個單一高層建築以及至少一個在實際都市區域的複合型建築的風洞實驗結果進行比較。

#### 十六、分析結果的呈現

##### (1) 風速分布

各點的風速分析結果，理論上應與基準點的風速成正比，因此使用風速比來呈現各點的風速與參考點風速的比例即可。而參考點的高度可採用氣象局的測量高度、標的建築物的樓高，或邊界層高度  $\delta$  等。

##### (2) 紊流動能

在市區環境中的氣流一般會隨著時間大幅變動，此變動會對在街上的行人產生相當程度的影響。CFD 除了平均風速外，亦能計算出紊流動能等速度變動的資訊。因此，在紊流動能預測精度確認無誤的情況下，

亦應一併提供。

(3) 明列分析條件

應將分析所採用的計算網格、各種邊界條件與使用的模型與參數等應完整呈現於 CFD 的分析結果報告中。

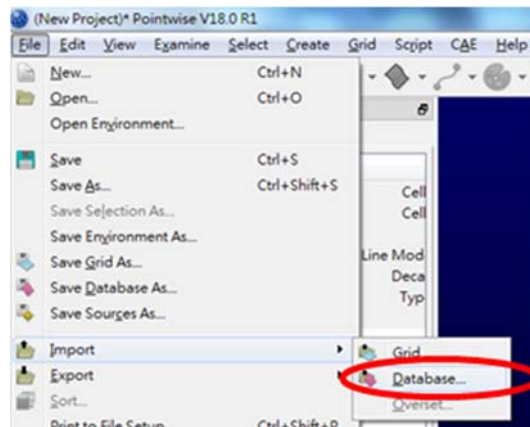
應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

## 附錄六 應用數值地形格網製作手冊

針對數值地形資料應用於都市風環境數值模擬，以下分為幾個步驟處理並逐一講解。

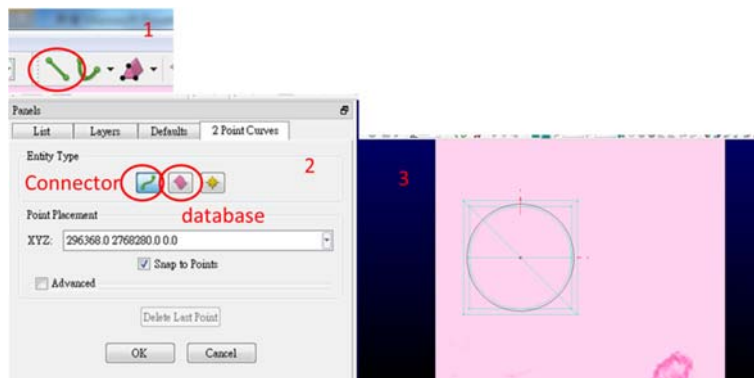
### 1. DSM 資料處理

當取得 DSM 資料後，首先將原始檔案轉換為 plot3D 格式，以便 pointwise 讀入。Pointwise 內可由 File->Import->Database 選取檔案匯入。



匯入資料後須先找到採樣地區與 DSM 資料的相對位置，根據模擬所需要的範圍將區域圈出，例如：需要方圓 450 公尺的地形地貌，則取出切圓邊長 450 公尺的方形區域。可利用 2 Point Curve 以及 Draw Curve 繪出直線與曲線。

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬



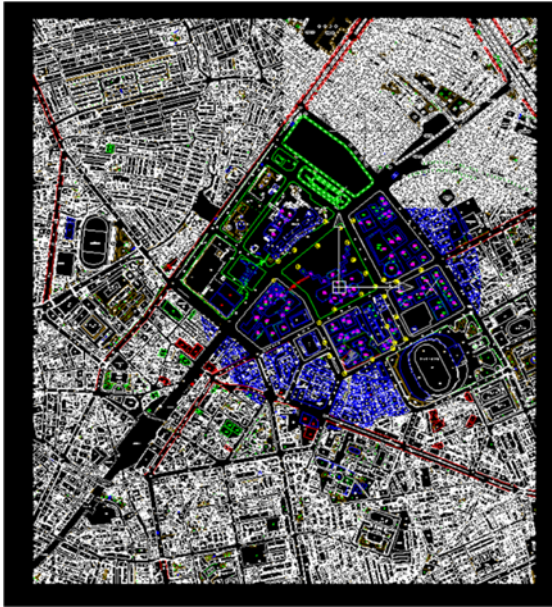
得到所需求的範圍座標後，須將方形區域向外延伸斜坡作為發展段，避免與現實狀況差距較大，斜坡角度不大於 7 度。此處建議另以自撰程式製作，以確保斜坡角度以及相關性，並將其轉換為 plot3D 形式，過程中須注意座標軸位置。



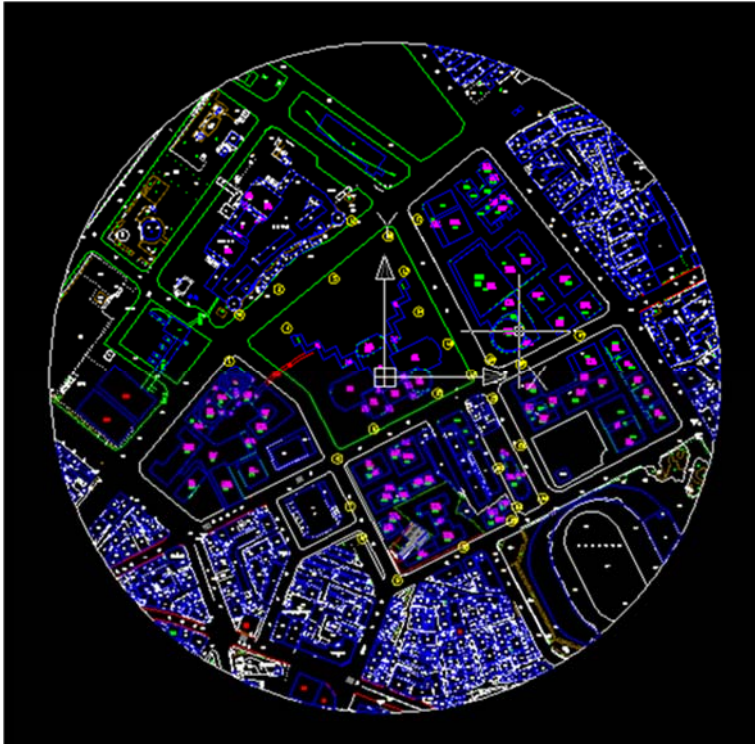
## 2. 數值圖檔轉換為 3D 建築量體

開啟向縣市政府申請該區域 CAD 地籍圖(包含樓高)。

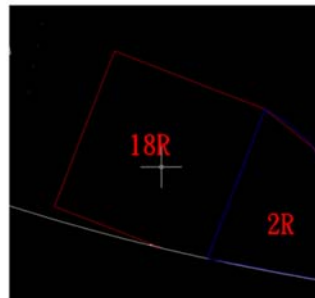
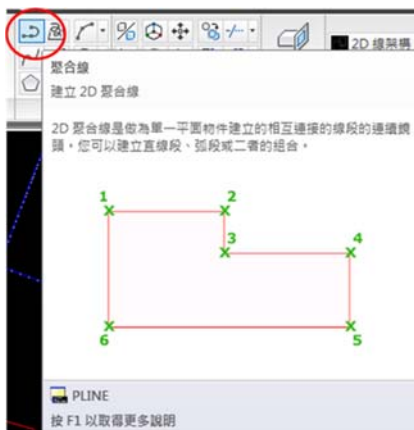


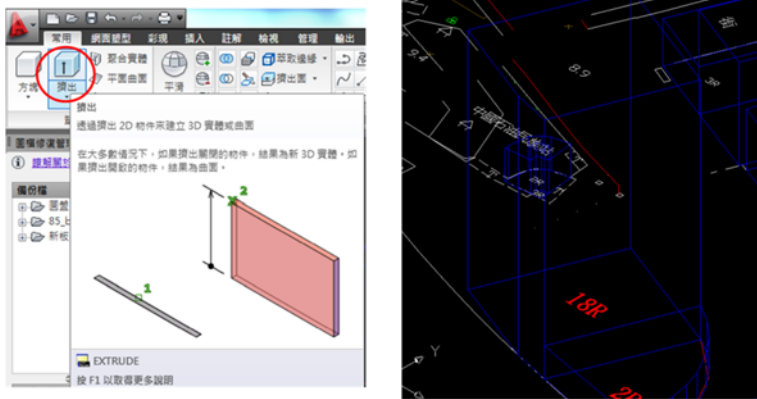


建立聚合線圈選出所需範圍，全選後使用 xc 指令->N(新邊界)->Y(刪除舊邊界)->S(選取聚合線) ，選取圈選範圍即可將所需區域外的部分關閉。



建立聚合線,將建築物圍起,使用擠出指令將每棟建築物 3D 模型完成,使用聚合線時須注意是否閉合,否則無法使用擠出。





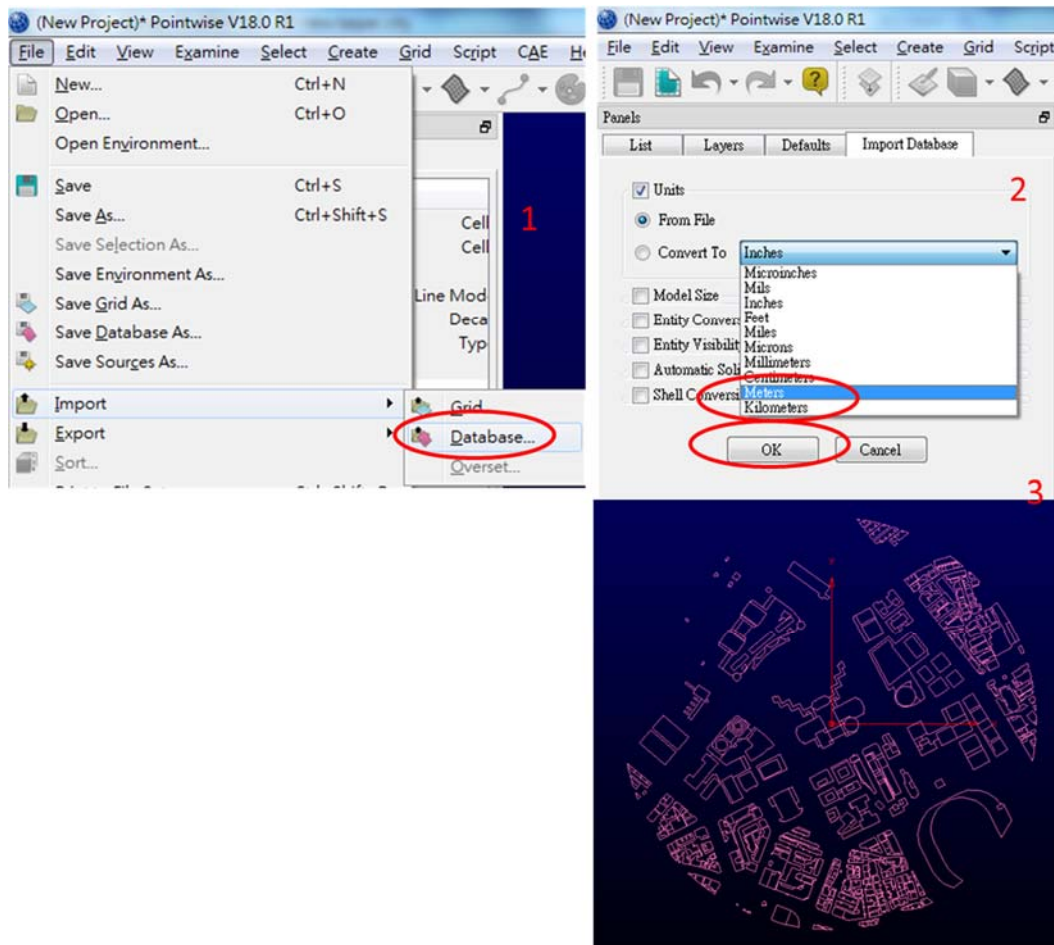
當完成所有 3D 建物後，將模型全選後匯出->其他格式->選擇 IGES 格式，即完成建築 3D 模型處理。



### 3. 建築 3D 模型匯入 POINTWISE

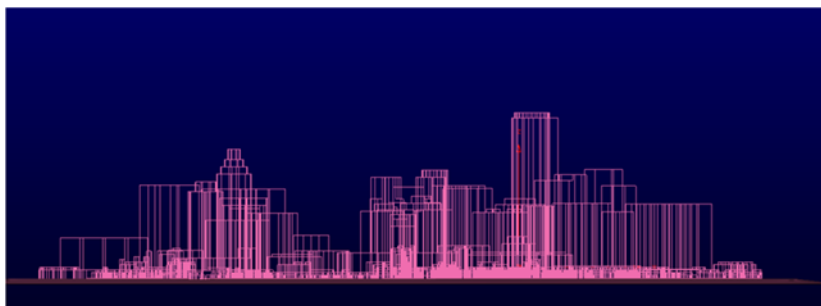
於 Pointwise 中，file->import->database，即可將 IGES 匯入為基礎模型。

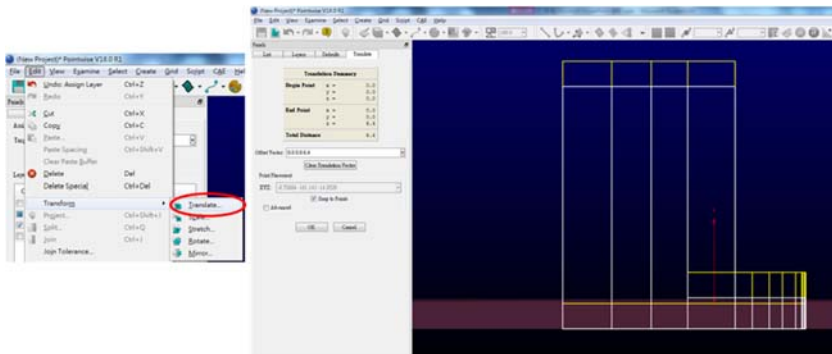
應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬



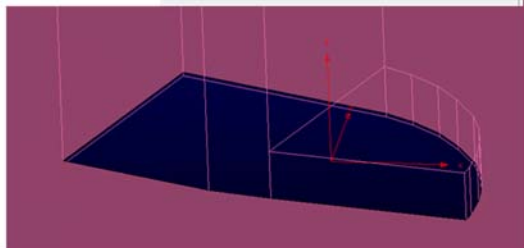
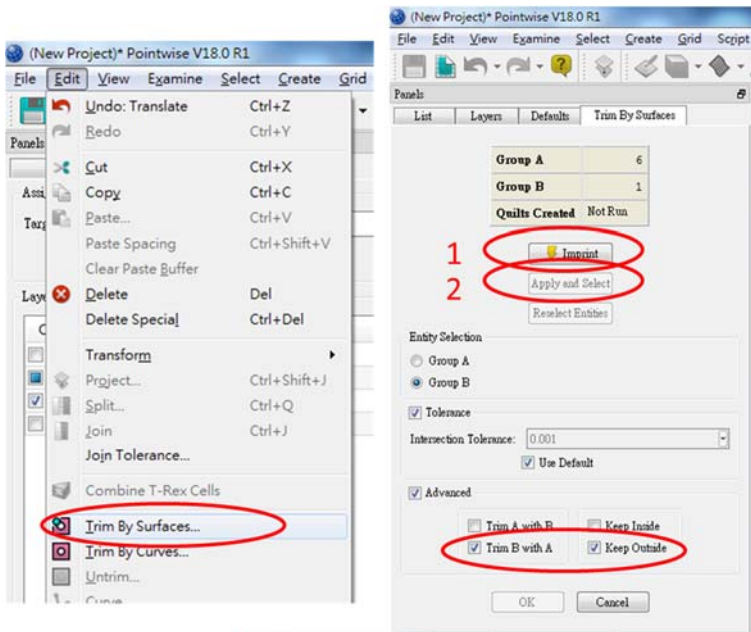
#### 4. 進行 DSM 資料與建築物縫合作業

首先將 DSM 數值模型與都市數值模行讀入後，選取建築物位移，調整高程使建物底層與 DSM 底面重合。



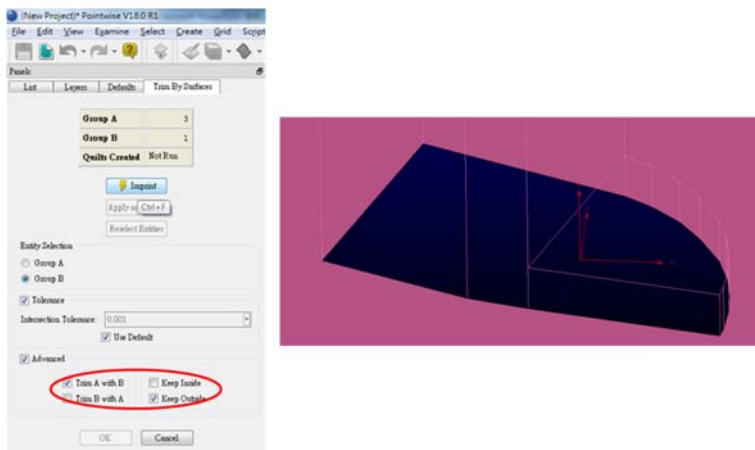


接著選用 Edit->Trim By Surface，選取建築物為 GroupA,底層為 GroupB，Advanced 則勾選 Trim B with A、Keep Outside，點選 Imprint 後 Apply and Select 進行縫合。



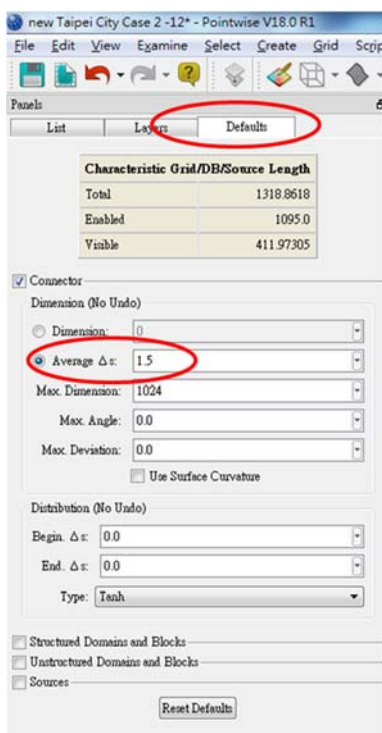
目前已完成底盤切割,重複上述步驟，須注意 Advanced 勾選 Trim A with B Keep Outside，點選 Imprint 後 Apply and Select，完成 DSM 地表與建物間的縫合。

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬



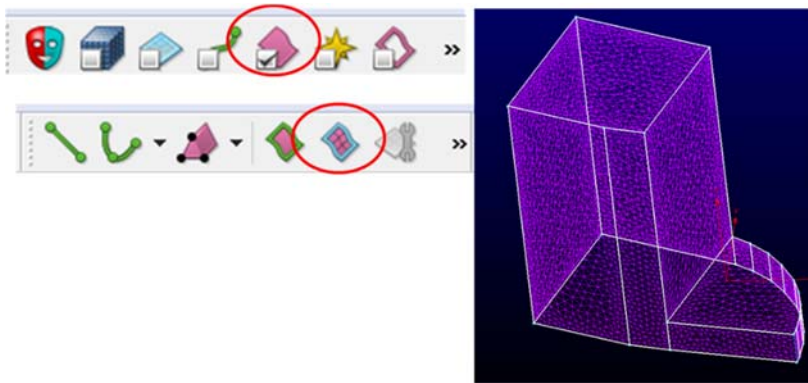
## 5. 網格繪製

於 Defaults-> Average  $\Delta S$ ，設定線段上的預設網格間距。

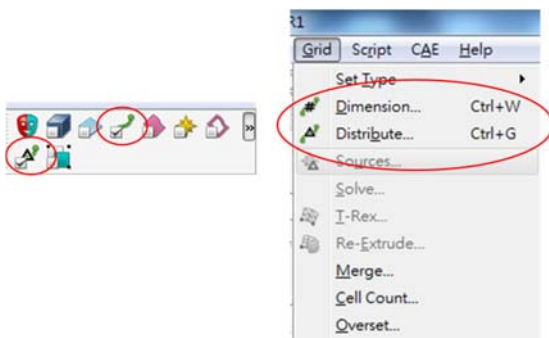


選取 database 後點選 Domains on Database Entities(選取 database 前記得勾選 database 選項)，即可得到初步網格分布。

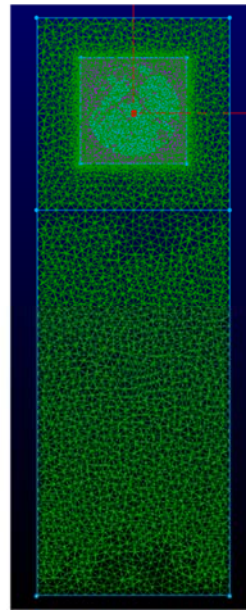
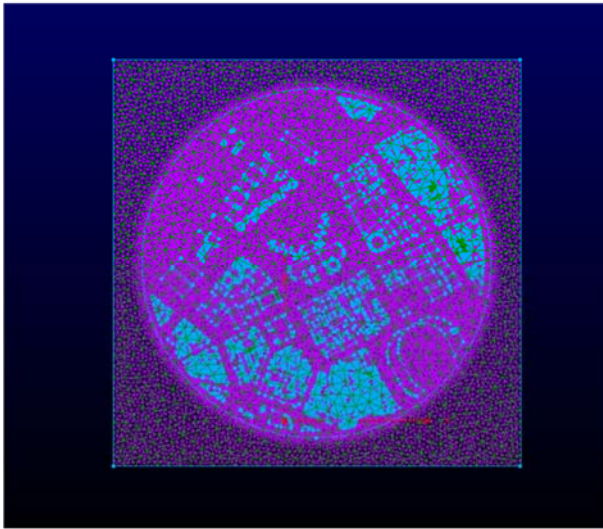




可藉由 Dimension 及 Distribute 來控制邊上網格間距與分布，滿足所需求之網格條件。

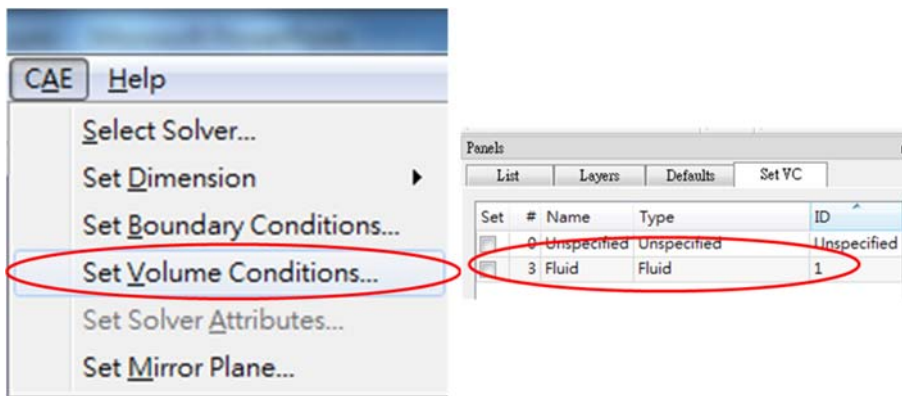


依照上述步驟逐步完成建築物以及所需範圍之網格，最終結果如下：



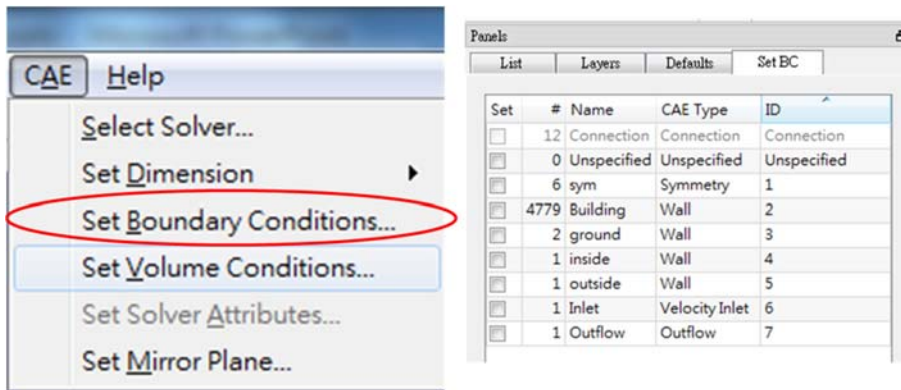
## 6. 邊界條件設定

定義計算域空間之流體。

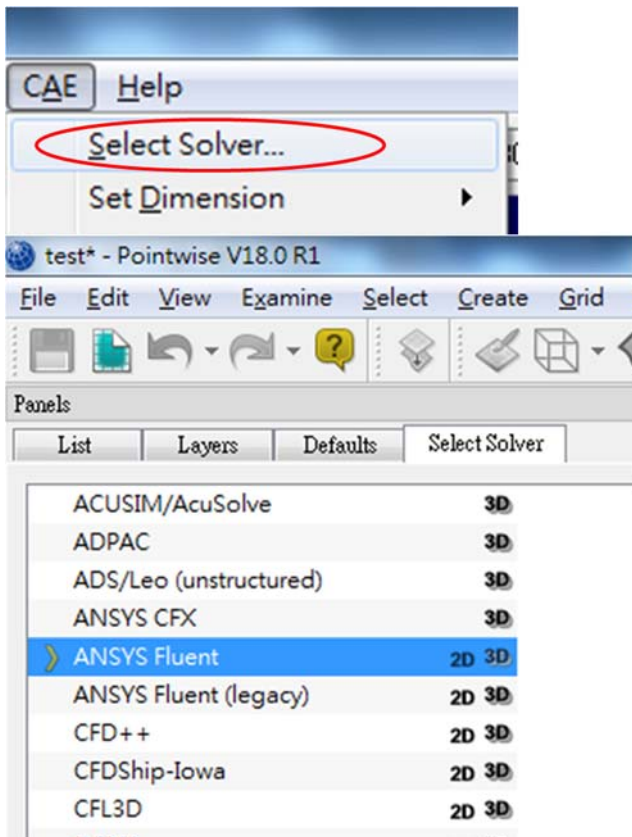


定義邊界條件，建築物表面與底面設定為 Wall 邊界，計算域頂部與左右設為對稱邊界(symmetry)，入流為 inflow，出流為 outflow。



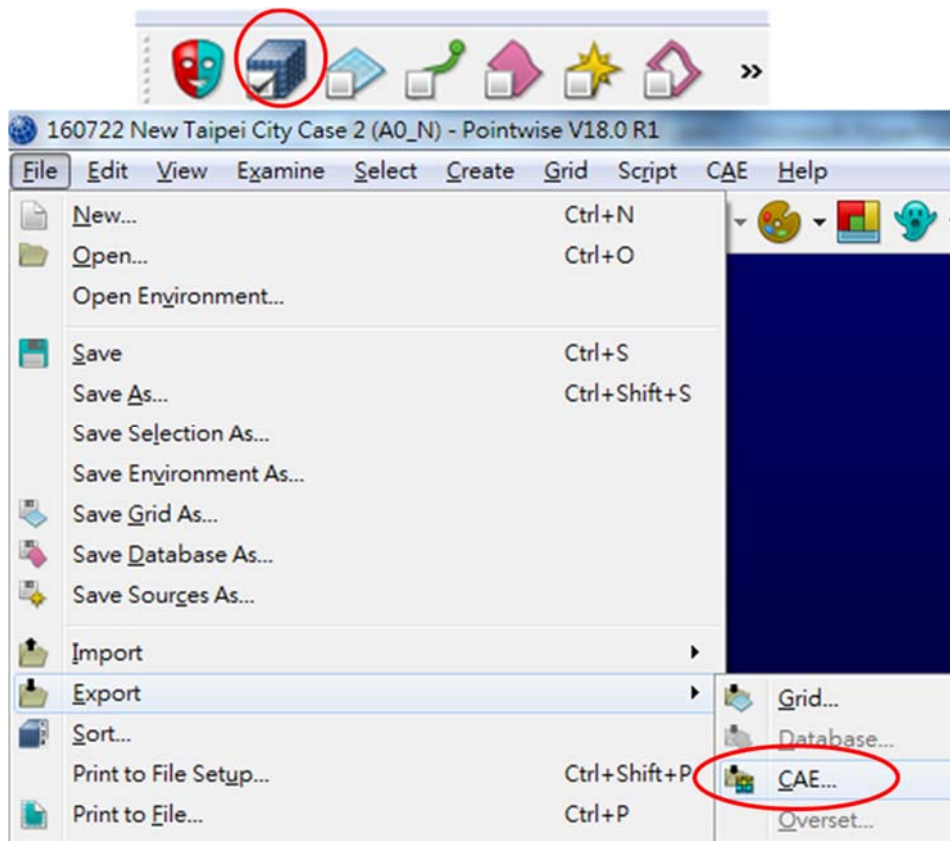


CAE->Select Solver，選擇 ANSYS Fluent 為求解器



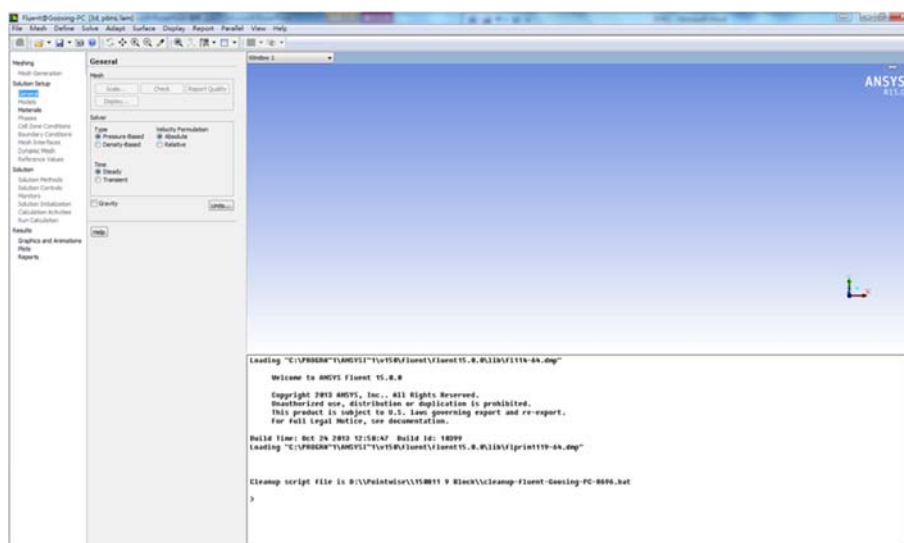
勾選 Block 選項後全選所有 Block，file->Export->CAE 即可輸出 FLUENT 之 cas 檔。

應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

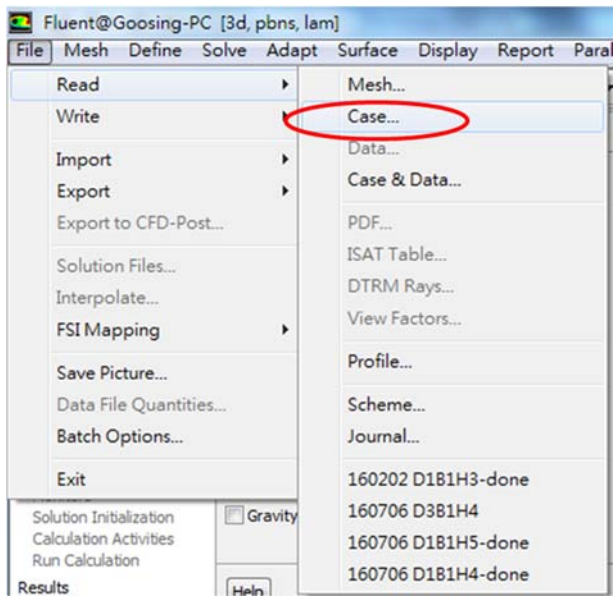


## 6. ANSYS FLUENT 讀入 cas

開啟 ANSYS FLUENT 計算流體力學程式。



File->read->Case



應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬

## 參考文獻

1. 丁育群、朱佳仁 (2000) , 高層建築物風場環境評估準則研議, 內政部建築研究所協同研究報告。
2. 郭建源(2010), 以風洞試驗建立行人風場環境影響評估準則之研究 (2/2), 內政部建築研究所自行研究報告。
3. 陳思仁、王成機, 內政部數值地形模型建置現況及加值應用, 2007, 國土資訊系統通訊, 61 2007.03, 2-14。
4. 蔡富安、張智安、張桓、陳良健、陳杰宗, 多尺度三維數位房屋模型建置, 2013, 航測及遙測學刊, 第十七卷, 第 4 期, 第 267-285 頁。
5. 大氣資料庫, 台灣颱風洪水研究中心, <https://dbar.ttfri.narl.org.tw/>。
6. AIAA, 1998, Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations, AIAA G-077-1998.
7. AIJ-GWE, 2007, AIJ Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings. Available at: [http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index\\_e.htm](http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm).
8. AIJ-GWL, 2005, AIJ Guide for Numerical Prediction of Wind Loads on Buildings. Architectural Institute of Japan, Japan.
9. AIJ-RLB, 2004, AIJ Recommendations for Loads on Buildings, Architectural Institute of Japan, Japan.
10. Blocken, B., and Carmeliet, J., 2004, Pedestrian wind environment around building: literature review and practical examples, Journal of Thermal Env. & BLDG. SCI., Vol.28, No.2 October.
11. Blocken, B., Stathopoulos, T., 2008, Wind environmental conditions in passages between two long narrow perpendicular buildings, Journal of

aerospace engineering, vol.21, pp. 280-287.

12. Blocken, B., Gualtieri, C., 2012, Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics, *Environmental Modelling and Software* 33: 1-22.
13. Blocken, B., Janssen, W.D., van Hooff, T., 2012, CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus, *Environmental Modelling and Software* 30, 15-34.
14. Blocken, B., Stathopoulos, T., 2013, Editorial to virtual special issue: CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: past achievements and prospects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 121: 138-145.
15. Casey, M., Wintergerste, T. 2000, Best Practice Guidelines, ERCOFTAC Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD, ERCOFTAC, Brussels.
16. Carl, D. M., Tarbell, T. C., and Panofsky, H. A. 1972, Profiles of wind and temperature from towers over homogeneous terrain, *J. Atmos. Sci.*, 30, pp. 788-794.
17. Cermak, J. E. and Arya, S. P. S. 1970, Problems of atmospheric shear flow and their laboratory simulation. *Boundary Layer Meteorology*, I, pp.40-60.
18. Cermak, J. E., 1975, Application of fluid mechanics to wind engineering”. A Freeman Scholar Lecture, *ASME Journal of Fluids Engineering*, 97 , No.1, , pp.9-38.
19. Cermak, J. E. and Arya, S. P. S., 1970, Problems of atmospheric shear flow

- and their laboratory simulation, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. I, pp. 40-60.
20. Davenport, A.G., 1972, An approach to human comfort criteria for environmental wind conditions, *Colloquium on Building Climatology*, Stockholm.
  21. Davenport, A.G. and Isyumov, N., 1967, The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading, *Proceedings of International Research Seminar, Wind Effects on Buildings and Structures*, pp.210-230.
  22. ESDU, 1982, Strong winds in the atmospheric boundary layer, Part I mean-hourly wind speeds. ESDU Data Item NO.8026, Engineering Sciences Data Unit, London, 51P.
  23. Frank, H. D., 1997, Pedestrian level Wind Criteria Using the Equivalent Average, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 66, pp. 215-226.
  24. Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüger, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N.G., 2004, Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: van Beeck, J.P.A.J. (Ed.), *COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment. Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, 5–7 May 2004*. Von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium.
  25. Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B. (Eds.), 2007, Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, COST Office Brussels, ISBN 3-00-018312-4.

26. Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2011, The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment – A summary, *International Journal of Environmental Pollution* 44(1-4): 419-427.
27. Jakeman, A.J., Letcher, R.A., Norton, J.P., 2006, Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling and Software* 21(5), 602-614.
28. Hunt, J. C. R., Poulton, E. C., and Mumford, J. C., 1976, The effects of wind on people; new criteria based on wind tunnel experiments, *Building and Environment*, Vol. II, pp.15-28, 1976.
29. Hunt, J. C. R. and Femholz, H., 1975, Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer, A report on Euromech 50, *J. F. M.*, 70, pt. 3, pp.543-559.
30. Isyumov, N., 1978, Studies of the pedestrian level wind environment at the boundary layer wind tunnel laboratory of university of Western Ontario, *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol. 3, pp.187-200.
31. Isyumov, N., and Davenport, A.G., 1976, The ground level wind environment in build-up areas, *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, United Kingdom, p.403-422.
32. Irwin, H. P. A. H., 1981, A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds". *J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 7, pp.219-239.
33. Lawson, T.V. and Penwarden, A.D., 1976, The effects of wind on people in



- the vicinity of buildings, Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, United Kingdom, pp. 605-622.
34. Maza, J., Nicoletti, G., 2006, CFD-RANS applications in complex terrain analysis. Numerical vs experimental results. A case study: Cozzovallefondi wind farm in Sicily, European Wind Energy Conference, Athens.
  35. Melbourne, W. H., 1978, Criteria for Environmental Wind Conditions”, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 3, pp.241-249.
  36. Mochida, A., Lun, I. Y. F., 2008, Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, pp.1498–1527.
  37. Murakami, S., Iwasa, Y. and Morikawa, Y., 1986, Study on Acceptable Criteria for Assessing Wind Environment Ground Level Based on Residents’ Diaries, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol. 24, pp.1-18.
  38. Oguroa, M., Morikawa, Y., Murakami, S., Matsunawa, K., Mochida, A., Hayashi, H., 2008, Development of a wind environment database in Tokyo for a comprehensive assessment system for heat island relaxation measures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96 , pp. 1591–1602.
  39. Penwarden, A. D., 1973, Acceptable wind speeds in towns”, Building Science. Vol.8, pp.259-267.
  40. Penwarden, A. D., and Wise, A. F. E., 1975, Wind Environment around

Buildings, Building research Establishment Report H.M.S.O.

41. Stathopoulos, T., Wu, H., and Bedard, C., 1992, wind environment around buildings: a knowledge-based approach”, J. of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 41-44, pp.2377-2388.
42. Tamura, Y., Van, P. P., 2015, Development of CFD and applications: monologue by a non-CFD-expert, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 144, 3-13.
43. Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T., 2008, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, 1749-1761.
44. Villanueva, J. K. S., Ang, M. R. C. O., Inocencio, L. C. V., Rejuso, M. V. D., Tolentino, J. T., 2015, Urban wind flow simulation of lidar-extracted building geometry in up diliman, quezon city, philippines using computational fluid dynamics model, Asian Conference on Remote Sensing, Manila, Philippines.
45. Williams, C. J. and Soligo M. J., 1991, A Discussion of the Components for a Comprehensive Pedestrian Level Comfort Criteria,” Eighth International Conference on Wind Engineering, London.
46. Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., Shirasawa, T., 2005, Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan , Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, pp.1551–1578.
47. Yoshida, S., Ooka, R., Mochida, A., Murakami, S., Tominaga, Y., 2006.

Development of three dimensional plant canopy model for numerical simulation of outdoor thermal environment. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Urban Climate (ICUC 6), Goteborg, Sweden, June 12–16.

**應用高精度數值地形模型進行 CFD 風場模擬**

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：方富民、黎益肇、賴冠廷、李唯嘉

出版年月：105 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：978-986-05-0831-4 (平裝)